

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

**Přádková
Sára**

2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Prádková** Jméno: **Sára** Osobní číslo: **470184**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Plazmové zpracování povrchu wolframu - ohřev, natavení

Název bakalářské práce anglicky:

Plasma treating of tungsten surface - heating, melting

Pokyny pro vypracování:

Provést rešerši na téma fúze, PTA navařování, plasma facing materials, funkčně gradované materiály
Experimentálně ověřit účinek působení plazmatu na wolframovou podložku při různých režimech - přehřátí, natavení
Charakterizovat základní vlastnosti ovlivněných a přetavených vrstev
Zhodnotit výsledky

Seznam doporučené literatury:

ELIEZER, Yaffa. a Shalom. ELIEZER. The fourth state of matter: an introduction to plasma science. 2nd ed. Philadelphia: IOP, 2001
MATĚJČEK, J. Materials for Fusion Applications. Acta Polytechnica [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013
D'OLIVEIRA, A., R. PAREDES a R. SANTOS. Pulsed current plasma transferred arc hardfacing. Journal of materials processing technology. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2006
NAEBE, Mino a Kamyar SHIRVANIMOGHADDAM. Functionally graded materials: A review of fabrication and properties. Applied Materials Today [online]. 2016

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Rohan, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

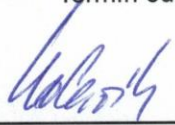
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

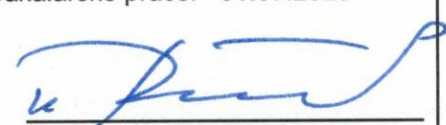
Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**

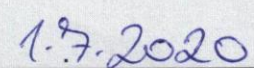

Ing. Pavel Rohan, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

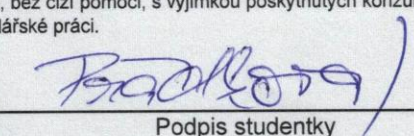

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.


Datum převzetí zadání


Podpis studentky

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na plazmové přetavení plazmového nástřiku wolframu, jako perspektivního materiálu pro první stěnu fúzních reaktorů typu tokamak.

V rešeršní části práce je stručně shrnut princip termonukleární fúze a funkce reaktorů typu tokamak. Popsány jsou materiály vystavené působení plazmatu (*PFM*) a funkčně gradované materiály (*FGM*). Dále jsou představeny technologie plazmového navařování (*PTA*) a přetavení, jako perspektivní technologie pro jejich výrobu.

V experimentální části práce je zkoumáno nastavení parametrů navařovacího zařízení pro docílení zahlazení struktury nástřiku při zachování charakteristiky vrstvy. Tato práce vznikla ve spolupráci s Ústavem fyziky plazmatu Akademie věd České republiky, v.v.i.

Klíčová slova

PFM, wolfram, tokamak, termonukleární fúze, plazmové přetavení, plazmový nástřik

Abstract

This bachelor thesis focuses on a plasma remelting of a plasma sprayed tungsten, as a perspective material for the first wall of a tokamak fusion device.

In the theoretical part there is briefly summarized the principle of thermonuclear fusion and tokamak type fusion devices. Plasma Facing Materials (*PFM*) and Functionally Graded Materials (*FGM*) are described here as well. Moreover, plasma hardfacing and remelting are introduced as technologies for production of such materials.

In the experimental part, the setting of suitable parameters of PTA machine is examined, with the goal of smoothing the sprayed structure while the characteristics of the coating stay intact. This thesis was created in collaboration with Institute of Plasma Physics of the Czech Academy of Sciences (public research institute).

Keywords

PFM, tungsten, tokamak, thermonuclear fusion, plasma remelting, plasma sprayed coating

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci „Plazmové zpracování povrchu wolframu – ohřev, natavení“ vypracovala samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použila, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Sára Přádková

Poděkování

Ráda bych poděkovala panu Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D. za odborné vedení, užitečné materiály, cenné připomínky, ochotu a trpělivost při tvorbě této bakalářské práce. Dále děkuji panu Ing. Jiřímu Matějčíkovi, Ph.D. z Ústavu fyziky plazmatu AV ČR za poskytnuté vzorky. Nakonec chci poděkovat své rodině za nesmírnou trpělivost a podporu během studia.

Obsah

1	Termojaderná fúze	8
1.1	Zdroj Sluneční energie.....	8
1.2	Objev slučování jader vodíku	8
1.3	Princip jaderné fúze.....	9
1.4	Plazma	9
1.4.1	Inerciální a magnetické udržení plazmatu	10
1.5	Tokamak.....	12
1.5.1	Divertor	14
1.5.2	První stěna reaktoru.....	14
1.5.3	Projekt ITER.....	14
2	Materiály vystavené působení plazmatu.....	15
2.1	Kritéria pro výběr PFM.....	15
2.2	Materiály vhodné k vystavení působení plazmatu	16
2.2.1	Wolfram	16
2.3	Funkčně gradované materiály	17
3	Plazma v povrchovém inženýrství.....	17
3.1	Plazmové navařování.....	17
3.2	Plazmový nástřík	18
3.3	Plazmové přetavení.....	19
3.4	Termočlánky.....	19
4	Experiment	21
4.1	Použitá zařízení.....	21
4.1.1	PPC 250 R6.....	21
4.1.2	Almemo 5690-2.....	21
4.1.3	Zařízení pro navařování termočlánků BT-2	21
4.1.4	Termočlánky typu K.....	21
4.1.5	Laboratorní pila Struers Labotom-3.....	21

4.2	Polotovary.....	22
4.2.1	Upnutí vzorku.....	22
4.2.2	Měření teploty.....	23
4.3	Vstupní parametry	23
4.3.1	Konstantní parametry	23
4.3.2	Proměnné parametry	24
5	Výsledky a diskuze	25
5.1	Průběh experimentu	25
5.1.1	Vzorek č. 1	26
5.1.2	Vzorek č. 2	27
5.1.3	Vzorek č. 3	29
5.1.4	Vzorek č. 4	31
5.1.5	Vzorek č. 5	32
5.1.6	Vzorek č. 6	34
5.1.7	Vzorek č. 7	35
5.1.8	Vzorek č. 8	37
5.1.9	Vzorek č. 9	38
5.1.10	Vzorek č. 10	40
5.1.11	Vzorek č. 11	41
5.1.12	Vzorek č. 12	43
5.1.13	Vzorky č. 13, 14, 15	44
5.2	Diskuse výsledků	46
6	Závěr.....	48
	Reference	49
	Seznam obrázků.....	54

1 Termojaderná fúze

1.1 Zdroj Sluneční energie

S příchodem zákona o zachování hmoty a energie se lidstvo začalo zajímat, co by mohlo být zdrojem energie slunečního záření. Velikost Slunce byla v té době již známá a zdálo se nemožné, aby tak malý zdroj produkoval tolik energie po celou dobu existence Země.

Dá se vypočítat, že celková energie vyzářená Sluncem je asi 4×10^{23} kilowattů. V devatenáctém století, jediné zdroje energie, které lidstvo znalo byly ty z fosilních paliv a energie gravitační.

Co se týče fosilních paliv, maximální energie, kterou bychom ze zdroje o hmotnosti Slunce mohli dostat by byla asi 2×10^{31} megajoule. Při síle vyzařování Slunce by tato energie byla dostatečná asi pro 1600 let. Vzhledem k tomu, že stáří Země jsou miliardy let, by tento zdroj energie rozhodně nestačil.

Myšlenka gravitačního kolapsu zase ztroskotala na tom, že na začátku kontrakcí by rozloha Slunce musela sahat o dost dál než k Zemi. Což opět nesouhlasilo s předpokládaným stářím Země.

Teprve s rozvojem teorie relativity a nukleární fyziky ve dvacátých letech minulého století vznikly nástroje nutné pro zformulování uspokojivé teorie. [1]

1.2 Objev slučování jader vodíku

Ve dvacátých letech přišel anglický chemik a fyzik F. W. Aston s klíčovým experimentem, ve kterém měřil hmotnost mnoha různých atomů, mezi nimi i helium a vodík. Aston zjistil, že jádro helia je lehčí než čtyři jádra vodíku, ze kterých se skládá. [2]

Tohoto objevu se chytil astrofyzik Sir Arthur Eddington, který se na hvězdy začal dívat jako na koule horkého plynu složené hlavně z vodíku. Teplota nutná k tomu, aby se vyrovnaly vnitřní gravitační síly by pak byla asi 15 milionů Kelvinů. Eddington se domníval, že za těchto podmínek je možné, aby se jádra vodíku slučovala, a že když se tak stane, uvolní se jaderná energie hélia, o kterou je výsledný atom lehčí. Podle Einsteinovy teorie závislosti hmoty na energii $E = \Delta mc^2$, kde c je rychlost světla, by toto umožňovalo Slunci zářit 100 miliard let. [1] [2]

Přes určité pochyby a nejasnosti měl Eddington v zásadě pravdu. Jeho myšlenkám dal pevný teoretický základ německý fyzik Hans Bethe, který v roce 1939 dokázal, že různé jaderné procesy jsou možné v závislosti na přesných podmínkách.

Ve Slunci začíná hlavní proces v jádře vodíku. V první fázi dochází ke sloučení dvou protonů za uvolnění pozitronu a zformování deuteronu. Je to extrémně pomalý proces ale ve chvíli, kdy je deuteron zformován, trvá jen pár vteřin, než se přidá další proton a vznikne lehký izotop helia, He^3 . Jádro He^3 pak čeká asi milion let, než se spojí s dalším He^3 a vytvoří He^4 za uvolnění dvou protonů.

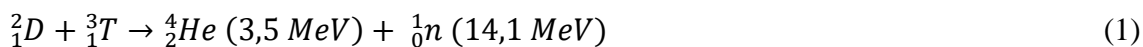
Veškerá energie uvolněná v této sérii reakcí je asi 6×10^8 megajoule na kilogram vodíku. To je 60 milionkrát více než energie na kilogram dostupná z fosilních paliv. [1]

1.3 Princip jaderné fúze

Energii z jádra lze uvolnit dvěma způsoby. Štěpením jader těžkých prvků, které se používá ve štěpných atomových elektrárnách, nebo slučováním prvků lehkých, které je principem termonukleární fúze. [3]

Aby začala působit přitažlivá síla a došlo ke sloučení jader, je nutné překonat odpudivou elektrostatickou sílu protonů v jádrech a přiblížit je na vzdálenost 10^{-14} m. Toho je možné dosáhnout ohřátím jader na velmi vysoké termonukleární teploty. Kinetická energie částic se tím dostatečně zvýší, aby jádru pomohla překonat elektrostatický odpor a přiblížit se na vzdálenost nutnou ke sloučení. [3] [4]

Nejsnáze dosažitelnou jadernou reakcí, při níž se jádra slučují, je, díky své nízké zápalné teplotě, reakce těžších izotopů vodíku – Deuteria a Tritia, D-T reakce:



Hmota zahřátá na zápalnou teplotu D-T reakce, se nachází v plně ionizovaném stavu. Záporně nabitě elektrony a kladně nabitě ionty se pohybují nezávisle. Tento stav se nazývá plazma. [3] [5]

1.4 Plazma

Název plazma pro ionizovaný plyn jako první použil Irving Langmuir. Přenos částic v ionizovaném sloupci a v krevní plazmě mu připadal podobný.

Plazma Langmuir chápal jako oblast výboje plynu, která není ovlivněna stěnami nebo elektrodami a má následující vlastnosti:

1. V plazmatu jsou volné nosiče elektrického náboje.
2. Plazma vykazuje kolektivní chování.
3. Plazma je kvazineutrální. [3] [6]

Se zvyšující se teplotou získávají částice větší volnost. V plynu se částice na rozdíl od pevného skupenství a tekutiny mohou pohybovat volně, elektrony se však pohybují pouze po svých orbitalech uvnitř atomu, podle pravidel kvantové mechaniky. V plazmatu jsou ale elektrony osvobozeny z atomů a nabývají tak naprostou volnost pohybu.

V důsledku ztráty některých elektronů získávají atomy pozitivní elektrický náboj a jsou nazývány ionty. Plazma je tedy plyn skládající se z pozitivně a negativně nabitých částic v takovém poměru, že celkový náboj je roven nule. Volně se pohybující elektrony mohou vést elektrický náboj, plazma je tudíž elektricky vodivý plyn.

Pro přeměnu plynu v plazma je nezbytné vytrhnout alespoň některé elektrony z atomů, a tím je změnit v ionty. Toto oddělení se nazývá ionizace.

Ionizace může být dosaženo několika metodami, těmi nejdůležitějšími jsou:

- a) ionizace teplem,
- b) ionizace radiací,
- c) ionizace elektrickým nábojem.

Všechny látky ionizují, dosáhnou-li dostatečně vysoké teploty. [7]

1.4.1 Inerciální a magnetické udržení plazmatu

Aby jaderná reakce vyprodukovala více energie, než je potřeba k vytvoření a ohřevu plazmatu, náhradě ztrát zářením a únikem částic z plazmatu, jsou kladeny určité požadavky na jeho hustotu n a teplotu T , respektive udržení jeho energie t_E . [3]

Za předpokladu, že zdrojová termojaderná energie a ztrátová energie záření a unikajících částic jsou vráceny do tepelného cyklu s účinností nepřevyšující 33 %,

odvodil v roce 1955 J. D. Lawson kritérium. Pro syntézu deuteria s tritiem při teplotě iontů $T_i \approx 2 \times 10^8$ °C platí:

$$n t_E \geq 0,5 \times 10^{20} m^{-3} s \quad (2)$$

Z tohoto kritéria vyplývají dva základní způsoby, jak dosáhnout kladného zisku termojaderné reakce. Jde to buď velkou hustotou ($\approx 10^{31} m^{-3}$) a krátkou dobou udržení ($\approx 10^{-10}$ s), nebo malou hustotou ($\approx 10^{20} m^{-3}$) a dlouhou dobou udržení (několik sekund). Prvnímu typu se říká inerciální udržení, druhému pak magnetické. [3]

Inerciální fúze se dá přirovnat k miniaturnímu výbuchu vodíkové bomby. Aby bylo možno udržet uvolněnou energii ve vakuové nádobě přiměřené velikosti, musí být uvolněná energie relativně malá. Běžně se uvažuje o energii velikosti 340 MJ, která se uvolní, při sloučení deuteria a tritia v 1 mg paliva. Takto malé množství je stlačeno na velmi vysokou hustotu a teplotu použitím velkých vnějších sil. [3] [8]

K tomuto stlačení se používá slupkového kulového terče (pelety), vyrobeného z materiálu s vysokým protonovým číslem a naplněné D-T palivem ($\leq 1,0$ mg/cm³). K dosažení vysoké hustoty a teploty, jež jsou pro fúzi potřeba, musí být peleta vystavena obrovskému výboji energie, aplikovanému co nejsymetričtěji je to možné. Množství energie potřebné pro tento proces je velmi vysoké (10^5 J pro ohřátí slupky o průměru 1 mm naplněné palivem) a může být dodáno laserem nebo iontovým svazkem. Slupka terče se ohřeje a okamžitě vypaří. Vnitřek pelety (palivo) je vlivem zachování hybnosti urychlen směrem ke středu koule a tím stlačen a zahřát. Při dosažení zápalné teploty fúzní energie produkuje tlak směrem ven, který brzo překoná sílu imploze a kapsle exploduje. [8]

Problémem inerciální fúze je, že energii potřebnou pro ohřátí pelety je nutno dodat v několika málo pikosekundách. Lasery mají buď příliš nízkou frekvenci a malou účinnost nebo jsou pro svou vysokou cenu nepoužitelné. Možnosti použití svazku iontů se zatím zkoumá pouze teoreticky. Extrémní požadavky na symetrii terče a absorpci energie na jeho povrchu jsou další překážkou. [3] [8]

Současným favoritem pro použití v termojaderných reaktorech je magnetické udržení. Jak název napovídá, pro udržení plazmatu v komoře, aniž by přišlo do kontaktu

se stěnami, se pracuje s vnějším magnetickým polem. Pokud je totiž plazmatu tento kontakt umožněn, nelze v něm zachovat požadované termionukleární teploty, protože materiál uvolněný ze stěn jej rychle ochladí. [9]

Magnetické udržení je možné jen proto, že všechny částice v plazmatu jsou nabitě. Takto nabitá částice pohybující se v magnetickém poli je ovlivňována Lorentzovou silou, která je kolmá jak ke směru pohybu částice, tak ke směru siločar magnetického pole. Tato síla způsobí, že se dráha nabitě částice zakřivuje, až kolem směru siločar magnetického pole opíše kružnici. Částice se v magnetickém poli bude pohybovat po spirále. Rádus této spirály je nepřímo úměrný síle magnetického pole, čím silnější pole je, tím menší kružnice nabitě částice opisují a tím lépe jsou polem drženy. Napříč magnetickým polem se pak pohybují díky srážkám, které je posunují na „sousední“ magnetické siločáry. [3] [9]

Existují dva základní typy magnetických nádob: nádoby otevřené a nádoby uzavřené. Ty otevřené řeší únik částic podél siločar zvýšením intenzity magnetického pole na obou koncích nádoby. Nabitá částice se tak kvůli zhuštění siločar odráží zpět do středu. Částice s dostatečně velkou podélnou složkou rychlosti však nezastaví ani toto zhuštění a z nádoby uniknou. [3]

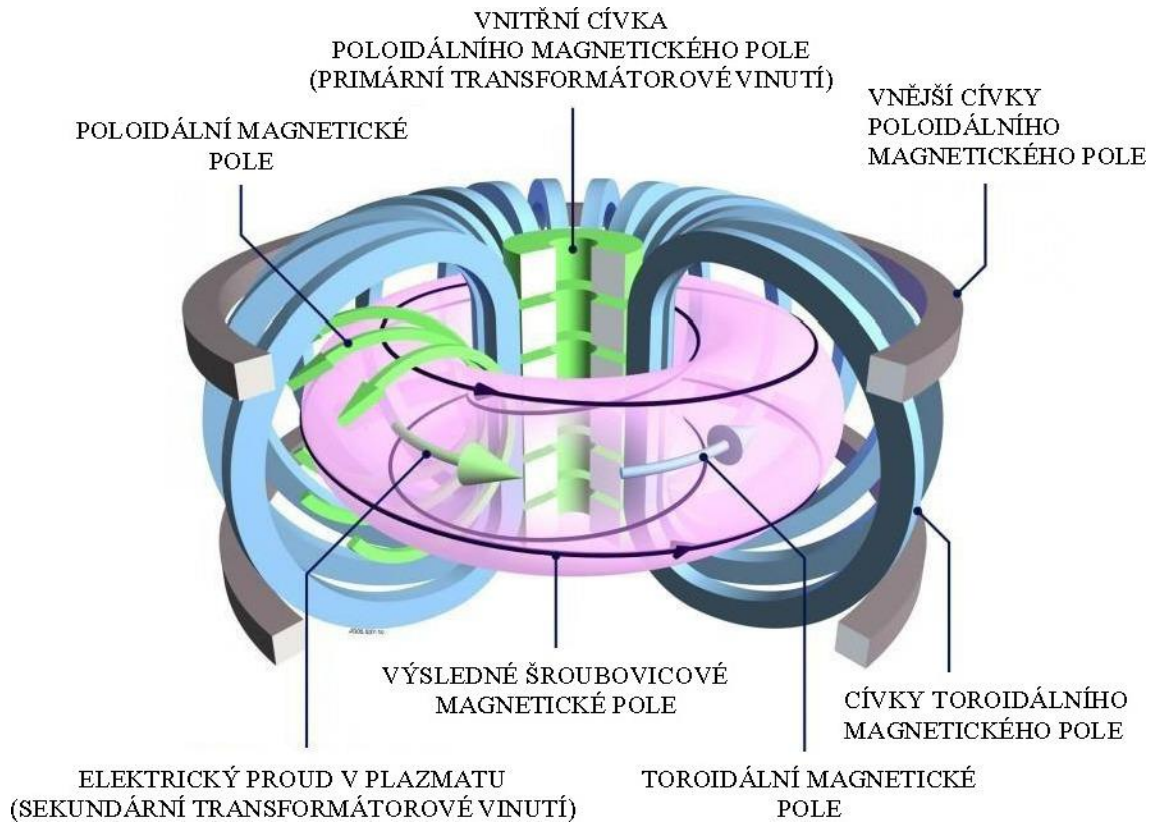
V uzavřených nádobách na rozdíl od těch otevřených siločáry magnetického pole neopouští vakuovou komoru. Plazma je drženo ve vymezeném prostoru použitím šroubovicového pole. Základními typy uzavřených nádob jsou tokamaky, stellarátory a toroidální pinče. [3]

1.5 Tokamak

Uzavřená magnetická nádoba typu Tokamak se ukázala být zatím nejúčinnějším zařízením pro udržení plazmatu. Hlavní částí je komora tvaru torusu, v níž jsou částice drženy pomocí magnetického pole, jehož indukční čára neopouští magnetickou nádobu. To zajišťuje hlavní pole (o síle 1-10 Tesla) vytvářené vnějšími cívkami, které se nazývají toroidní. [3] [9]

Čistě toroidní pole však nemůže kvůli srážkám mezi částicemi, místní nehomogenitě magnetického pole a odstředivé síle, plazma udržet. Vzniká zde tzv. toroidální drift a částice unikají přímo do stěn reaktoru. Z tohoto důvodu bylo vytvořeno další magnetické

pole okolo plazmatu. Toto pole, které je přibližně stokrát menší než pole toroidní, se nazývá poloidní a vytvoří se indukcí elektrického proudu v samotném plazmatu. Výslednicí spojení toroidního a poloidního magnetického pole je šroubovice. [9]



Obrázek 1: Základní schéma reaktoru typu Tokamak [10]

Termojaderných teplot se v tokamaku musí dosáhnout bezkontaktním ohřevem, protože všechny látky jsou již při teplotách okolo deseti tisíc stupňů plynné. Tyto zařízení využívají princip transformátoru. Vybitím kondenzátorové baterie do primárního vinutí se elektromagnetickou indukcí vybudí proud v sekundárním vinutí, kterým je zde plyn uvnitř komory. Díky značnému elektrickému odporu se plyn rychle ohřívá Jouleovým teplem a během milisekund dosáhne miliónů stupňů. Se vzrůstající teplotou ale elektrický odpor plazmatu klesá a induktivní ohřev začíná být neúčinný. [3]

Pro neúčinnost indukce při vyšších teplotách je potřeba jiné metody ohřevu. Velmi využívané jsou metody založené na absorpci elektromagnetického vlnění v ohřívaném médiu, jehož obdoba se uplatňuje v mikrovlnných troubách.

Další metodou je vstřík neutrálních atomů vodíku s energií rovnající se až stonásobku teploty plazmatu, které svoji energii okolnímu plazmatu srážkami předají. Ve chvíli, kdy se podaří dosáhnout termojaderných teplot, začnou se vodíková jádra slučovat

a nastává samoohřev. Část energie uvolňované fúzními reakcemi totiž plazma ohřívá podobně jako vstříkované částice předtím. [3]

Problémem tokamaků je, že jsou to z principu impulzní zařízení. Transformátor je připojen ke zdroji stejnosměrného narůstajícího proudu a po čase (kolem 10-20 sekund) dochází k nasycení transformátorového jádra nebo k proudovému přetížení primárního vinutí. Proud plazmatem tak vymizí a částice začnou unikat na stěny komory, dochází k rozpadu plazmatu a vyhasnutí výboje. [3]

Dalším problémem je odvod spalin fúzních reakcí z tokamaku. První tokamaky se tímto problémem příliš nezabývaly. Až s narůstající délkou výbojů a přibližováním se k termojaderným teplotám bylo nutné modifikovat komoru a vytvořit tzv. divertor. [3]

1.5.1 Divertor

Hlavní funkcí divertoru je odvod tepla a nečistot produkovaných fúzní reakcí. Tato konfigurace magnetického pole odchyluje siločáry na periferii plazmatického provazce do divertorové komory. Nasměruje tak částice z plazmatu do oblasti divertoru, kde se na jeho sběrných deskách zachytí a jsou neutralizovány na plyn, který se odsaje vakuovým systémem. [3] [11]

Současně je do komory vstříkováno nové palivo, což má za následek, že divertor je nejvíce tepelně namáhanou komponentou. Teplota povrchu panelů divertoru může v kritických místech dosahovat více než 2 000 °C a tepelný tok procházející panely je kolem 10-20 MWm⁻². [3] [11]

1.5.2 První stěna reaktoru

První stěna (*First Wall*) je stěna bezprostředně vystavená plazmatu. Jejím úkolem je chránit konstrukci reaktoru před jeho přímým působením.

Teploty první stěny tokamaku ITER by podle [12] měly dosahovat až 761 °C. Stěna bude nominálně zatížena tepelným tokem do hodnoty přibližně 0,5 MW/m² ale při přímé interakci s plazmatem by mohla být lokálně vystavena tepelným tokům vyšším. Při poruchách plazmatu může také docházet k natavení či vydrolení povrchu stěny. [13]

1.5.3 Projekt ITER

Projekt ITER byl oficiálně spuštěn roku 2006 jako společný podnik Evropské Unie, Indie, Japonska, Koreji, Ruska a Spojených Států. Jeho desetkrát větší objem

plazmatu než u momentálně největšího fungujícího tokamaku, z něj dělá unikátní zařízení, schopné plazma udržet lépe a déle. Jako experimentální zařízení ITER nemůže vyprodukovanou energii uchovávat ve formě elektřiny. Vybuduje však cestu k fúzním elektrárnám, které toho budou schopny. [14] [15]

Hlavním cílem projektu je demonstrovat proveditelnost fúze ve velkém měřítku. Jeho ambicí je být prvním fúzním zařízením, které vyprodukuje více energie, než je mu třeba dodat. Je navržen k výrobě 500 MW z 50 MW nutných k ohřevu plazmatu. Největšího úspěchu v tomto směru zatím dosáhnul Evropský tokamak JET, který z 24 MW dodaných k ohřátí vyprodukoval 16 MW fúzní energie. [14] [15]

2 Materiály vystavené působení plazmatu

Materiály vystavené působení plazmatu (*PFM – Plasma Facing Materials*) podstupují neustálé nárazové teplotní změny, stejně jako změny toku částic z plazmatu. Jejich hlavním úkolem je chránit podkladový materiál, ze kterého je vytvořena konstrukce tokamaku. [16]

2.1 Kritéria pro výběr PFM

Podmínky, v nichž musí materiály působit se mění v závislosti na typu zařízení. Obecně ale můžeme definovat základní požadavky.

Jako hlavní kritérium při výběru PFM musíme vzít v úvahu parametry plazmatu (proudění iontů a neutronů, teplotu) a teplotní proudy v konkrétních oblastech. Pozornost musíme věnovat také opotřebením a předpokládané životnosti materiálu a uvolňování nečistot do plazmatu. Částice unikající z plazmatu totiž ovlivňují materiál stěny, který se, ať už fyzicky nebo chemicky, opotřebovává. Následně může docházet k absorpci nečistot, a redepozici erodovaného materiálu. Kdyby bylo částic uvolněných zpět do plazmatu příliš mnoho, mohly by způsobit radiační ztráty a tím ukončit radiační výboj. [16] [17]

Požadované charakteristiky materiálu vystaveného plazmatu jsou:

- kompatibilita s plazmatem a podložním materiálem,
- stabilita při vysokých teplotách,
- vysoká odolnost proti opotřebením,
- vysoká lomová houževnatost,
- vysoká odolnost proti teplotním šokům,

- vysoká tepelná vodivost,
- minimální degradace vlastností vlivem ozáření,
- co nejmenší tendence zadržovat tritium. [16]

Všechny tyto požadavky samozřejmě nemůže uspokojit pouze jeden materiál. Musí se proto hledat kompromisy. [17]

2.2 Materiály vhodné k vystavení působení plazmatu

Když se u prvních tokamaků zjistilo, že použití materiálů s vysokým protonovým číslem vede k vysokým radiačním ztrátám v centru plazmatu, přešlo se k materiálům s nízkým protonovým číslem na bázi uhlíku, ve většině případů ke grafitu. Použitím grafitu se zlepšil výkon plazmatu a umožnilo stabilní zvýšení fúzního výkonu. [18]

Problémem grafitu a obecně všech materiálů s nízkým protonovým číslem je jejich vysoké opotřebení i při nejnižších teplotách plazmatu, což má za následek velmi krátkou životnost, a tedy i častou potřebu materiál obměňovat. Kromě kratší životnosti eroze podporuje i zadržování tritia, což je značné bezpečnostní riziko. Mimo jiné grafit pod působením neutronů velmi rychle degraduje, čímž se snižuje jeho tepelná vodivost. [18]

Ostatní kovové materiály s nízkým protonovým číslem mají obecně nízkou teplotu tání a při vystavení neutronům produkují velké množství helia, což podporuje křehnutí materiálu. [18]

2.2.1 Wolfram

Velkou předností wolframu je jeho značná chemická odolnost. Má ze všech kovů nejvyšší teplotu tání (3422 °C) a je z nich po chromu druhým nejtvrdějším. [16]

Všechny hlavní studie pro budoucí fúzní výzkum a zařízení používají wolfram jako materiál vystavený působení plazmatu minimálně v divertoru, jelikož velikost opotřebení u materiálů s nízkým protonovým číslem, jako uhlík nebo beryllium, se zdá být, pro tato zařízení, příliš vysoká. [19]

Wolfram je hlavním kandidátem na PFM v budoucích fúzních reaktorech zejména pro svou vysokou teplotu tání, dobrou tepelnou vodivost, žáruvzdornost a rozměrovou stálost. Mimo jiné také netvoří hydridy a nezadržuje tritium. [16]

I přes to, že má wolfram oproti ostatním materiálům v oblasti termo-mechanických vlastností mnoho výhod, jeho použití zahrnuje, kvůli vysokému protonovému číslu, riziko nepřiměřeně velkých radiačních ztrát v centru plazmatu. [19]

2.3 Funkčně gradované materiály

Funkčně gradované materiály (*FGM – Functionally Graded Materials*) jsou navrženy tak, aby napříč průřezem měnily své vlastnosti, například mikrostrukturu nebo porozitu. Změna vlastností napříč objemem má umožnit materiálu splňovat velmi specifické funkce.

FGM se od klasických kompozitů liší hlavně tím, že přechod mezi různými materiály a jejich strukturami není ostrý, ale je nahrazen postupnou změnou v celém průřezu. [20]

3 Plazma v povrchovém inženýrství

3.1 Plazmové navařování

Metody navařování tvrdých povrchových vrstev (*hardfacing*) lze rozdělit podle formy přídavného materiálu. Je-li přídavný materiál přiváděn ve formě kovového drátu, jedná se o PAW (*Plasma Arc Welding*), pokud se používá prášek, je pak metoda známá jako PTA (*Plasma Transferred Arc*). [21]

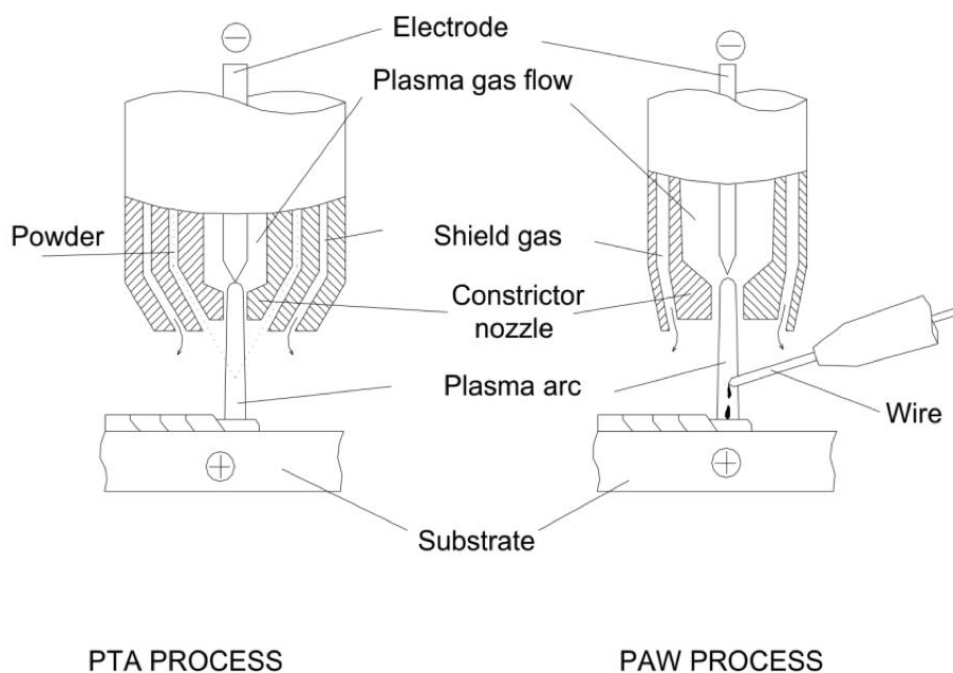
Oba procesy používají netavící se wolframovou elektrodu umístěnou uvnitř hořáku, chlazenou trysku, ochranný plyn pro ochranu svarové lázně a plazmový plyn. Hlavní charakteristikou PTA je způsob přidávání materiálu, prášek místo drátu, což vyžaduje použití podávacího plynu. Pro vytvoření návaru je tedy potřeba speciálního podavače přídavného materiálu, který prášek dopraví do oblouku. [21]

Návary vytvořené metodou PTA se vyznačují menším závarem a s tím související výrazně nižší mírou promísení základního a přídavného materiálu (příměs základního materiálu v návaru mezi 6 až 10 %). Díky nízkému promísení jsou tvrdší než obdobné návary vzniklé použitím metody PAW (promísení mezi 20 až 25 %). Lepší rozměrová stálost, menší tepelně ovlivněná oblast a jemnější mikrostruktura jsou dalšími nezanedbatelnými přednostmi této metody. Proces je charakteristický extrémně vysokými teplotami (až 20 000 – 30 000 °C), výbornou stabilitou oblouku, vysokými svařovacími rychlostmi (relativní rychlost hořák/obrobek je 2 až 16 mm/s) a v neposlední

řadě nízkým dopadem na životní prostředí (nízké emise oxidů, nízké procento ultra-jemného prášku). [21] [22]

Při PTA navařování je plazma zapáleno uvnitř hořáku mezi wolframovou elektrodou a tryskou prostřednictvím nízkoproudého pilotního oblouku. Následně se oblouk přemístí z ústí k obrobku a stane se součástí elektrického obvodu. Kovový prášek je přiváděn do plazmového paprsku zajišťujícího vysokou koncentraci energie. [22]

Pokud se u PTA metody do svaru nepřivádí žádný přídavný materiál, lze zařízení použít k plazmovému přetavení povrchu.



Obrázek 2: Srovnání PTA s PAW [21]

3.2 Plazmový nástřik

Při plazmovém nástřiku je materiál ve formě prášku unášen do plazmového proudu (*jetu*), který jej nataví a urychlí proti základnímu materiálu, kde se zachytí, zarovná, zkrystalizuje a vytvoří povlak. Výhodou této metody je její jednoduchost, schopnost pokrýt velkou plochu a možnost oprav nástřiku bez nutnosti rozebrání reaktoru. [23]

Hlavní nevýhodou plazmového nástřiku je jeho pórovitost. Tyto povlaky obsahují velké množství otvorů, trhlin a nespojitostí, které i v relativně malém zlomku objemu snižují mechanické a tepelné vlastnosti materiálu, jako Youngův modul, tepelnou vodivost a hlavně tvrdost. [24]

Nedostatky plazmového nástřiku je možné eliminovat pomocí přetavení. V několika studiích (např.: [24], [25] a [26]) bylo dokázáno, že u přetavením ošetřeného povlaku se zmenšuje porozita a hrubost povrchu, zvyšuje se homogenita nástřiku, jeho tvrdost, přilnavost, odolnost proti otěru a teplotním šokům.

3.3 Plazmové přetavení

Při přetavení dochází ke změně vlastností povrchu materiálu, ten pak získává vyšší tvrdost a větší odolnost proti otěru. K přetavení povrchu je potřeba velmi intenzivní zdroj koncentrované energie, jako například laser, elektronový svazek nebo plazmový oblouk. Díky vysoké rychlosti ohřevu a malé ohřívané zóně je možno na povrchu materiálu dosáhnout samozakalení a minimální deformace. [27]

V dnešní době se na přetavení povrchu nejčastěji používá laser. Jeho efektivita přenosu energie je ale dost nízká, většinou do 25 %. Část je totiž ztracena odrazem od povrchu, část odvodem tepla do okolního materiálu. Přetavená vrstva proto bývá docela tenká. Na povrchu kovu se taky často objevují mikrotrhliny, kterým nelze předejít ani předehrátím ošetřovaného materiálu. V neposlední řadě jde taky o ceny laserů, které bývají docela vysoké. [24] [27] [28]

Jak je všeobecně známo, plazmový oblouk může dosáhnout teplot vyšších než 10 000 K, což je teoreticky dostatečné k roztavení všech druhů materiálů. I přes svou nižší energetickou hustotu (10^5 - 10^6 W cm⁻²) oproti laseru (10^7 W cm⁻²) je efektivita přenosu energie plazmatem podstatně vyšší (až 75 %). [27] [28]

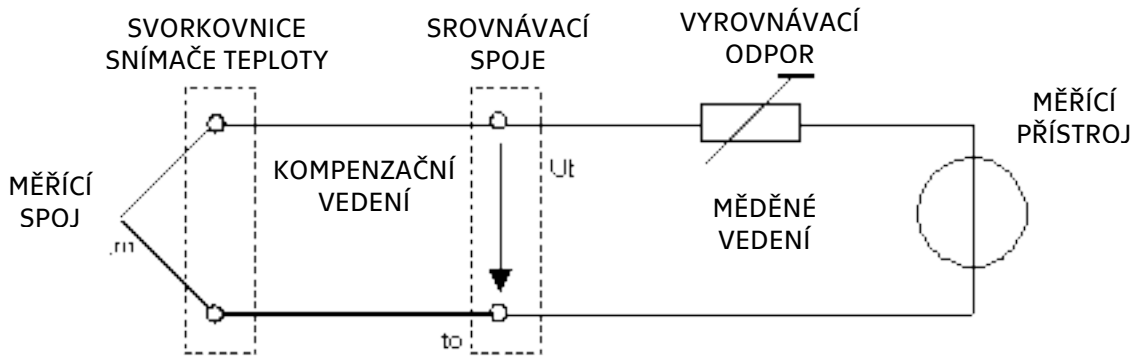
Z prací [27] [28] a [25] je patrné, že plazmový oblouk funguje podstatně lépe než laser. U povrchů přetavených plazmatem se na rozdíl od laseru neobjevují trhliny, přetavená vrstva je hlubší a mikrostruktura jemnější. Zvýšená korozivzdornost a odolnost proti otěru je samozřejmostí.

3.4 Termočlánky

Nejběžnějšími snímači pro měření teploty jsou termočlánky. Ty se skládají ze dvou různých drátů spojených na jednom konci a připojených k měřicímu přístroji na konci druhém. [29]

Termočlánky k měření využívají termoelektrického jevu. Princip spočívá v rozdílné teplotě spojů dvou různých kovů, které tvoří termočlánek. V uzavřeném

obvodu lze mezi oběma spoji naměřit termoelektrické napětí, které je dáno rozdílem kontaktních napětí, jež vzniká na obou spojích daných kovů. [30]



Obrázek 3: Schéma obvodu termočlánu [31]

Jeden konec termočlánu je udržován na stálé referenční teplotě a druhý konec je vystaven teplotě měřené. Pomocí voltmetru se měří termoelektrické napětí, na jehož základě lze stanovit rozdíl teplot obou spojů, a tak i měřenou teplotu. [30]

Pro malé teplotní rozdíly teplot T_1 a T_2 obou spojů daných kovů, platí přibližně lineární závislost termoelektrického napětí na teplotě, lze tedy psát

$$\Delta U = \alpha_{12}(T_2 - T_1) = \alpha_{12}\Delta T, \quad (3)$$

kde α_{12} je Seebeckův koeficient; $[\alpha_{12}] = V \cdot K^{-1}$. Ten závisí vždy na dané dvojici kovů. Termoelektrické napětí je tedy závislé pouze na rozdílu teplot a na daných materiálech, nezáleží ani na způsobu vedení tepla ani na rychlosti ohřevu materiálu. [30]

Termočlánu jsou všeobecně známé pro svoji všestrannost a víceúčelovost, existuje jich mnoho druhů, z nichž nejběžnější jsou z kovů základních (*Base Metal*). [29]

Tabulka 1: Některé základní typy termočlánu [29]

typ termočlánu	rozsah teploty [°C]	nejhorší standardní přesnost [°C]	materiál
J	0 až 750	2,2	železo vs. měď-nikl
K	-200 až 1250	2,2	nikl-chrom vs. nikl-hliník
E	-200 až 900	1,7	nikl-chrom vs. měď-nikl
T	-250 až 350	1,0	měď vs. měď-nikl

4 Experiment

Cílem experimentu je přetavit plazmový nástřik wolframu na uhlíkové oceli plazmatem tak, aby došlo k zahlazení struktury nástřiku, a přitom zůstala zachována charakteristika vrstvy.

4.1 Použitá zařízení

4.1.1 PPC 250 R6

Pro přetavení plazmového nástřiku wolframu byl použit plazmový navařovací automat PPC 250 R6 (KSK s.r.o., Česká Třebová), který je určen pro navařování rotačních součástí. Stroj umožňuje navařování jak kontinuálním, tak pulzním proudem. Hořák se pohybuje ve čtyřech (X, Y, Z, N) a stůl ve dvou osách (C, R). Automat umožňuje předem naprogramovat cyklus navařování. Dále je možné mísení dvou různých přídatných materiálů v libovolném poměru, ty se přes směšovací nádobu podávají dále do hořáku. Pro účely této práce nebudou přídatné materiály použity. [32]

4.1.2 Almemo 5690-2

K zaznamenání teplot byla použita univerzální měřicí ústředna Almemo 5690-2 od společnosti AHLBORN. Ústředna s velkoplošným displejem disponuje velkou kapacitou paměti a vysokou rychlostí měření. Je na ní možné odečítat hodnoty až z 90 termočlánků. [33]

4.1.3 Zařízení pro navařování termočlánků BT-2

Toto zařízení navařuje termočlánky pro měření teploty pomocí kondenzátorového výboje. BT-2 je akumulátorový typ, takže umožňuje navařování i bez přívodu napětí ze sítě. Lze s ním navařovat dráty a termočlánky do průměru 1,4 mm. [34]

4.1.4 Termočlánky typu K

Termočlánky typu K jsou chrom-hliníkové termočlánky, které se používají v rozsahu teplot -200 až 1200 °C a jejich přesnost je lepší než 2,2 °C. [35]

4.1.5 Laboratorní pila Struers Labotom-3

Manuální stolní pila Labotom-3 je model umožňující řezat téměř jakýkoli materiál díky vyměnitelným řezným kotoučům. Díky aktivnímu chlazení není materiál výrazně tepelně ovlivněn. [36]

4.2 Polotovary

Pro experiment byly použity dva různé polotovary poskytnuté oddělením materiálového inženýrství Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky, v.v.i.

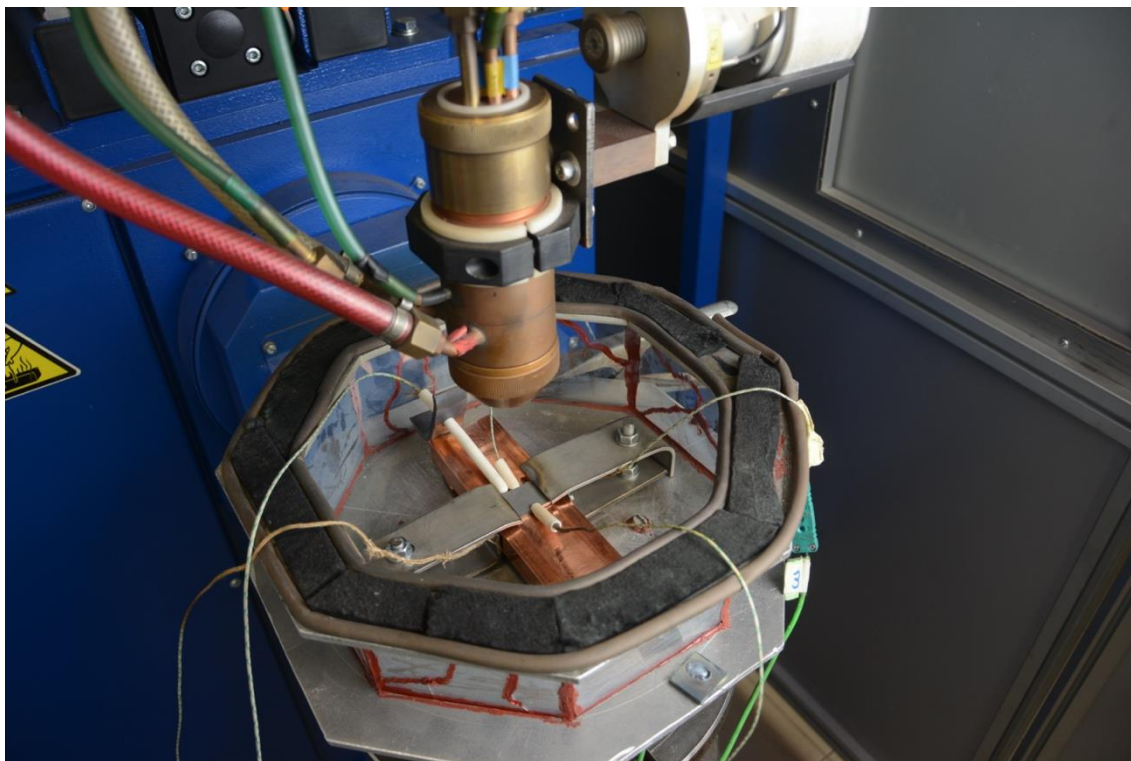
Prvním typem byly čtyři destičky z uhlíkové oceli jakosti 11523 s plazmovým nástřikem wolframu, které byly pro účely experimentu rozřezány na 12 stejných vzorků. Ocelový podklad měl tloušťku 2,45 mm a nástřik 0,85 mm.

Druhý typ polotovaru byl samonosný plazmový nástřik wolframu bez podkladového materiálu o tloušťce 4,1 mm.

Protože označení jakýmkoli druhem popisovače by se mohlo smýt nebo ovlivnit odvod tepla, byl na všechny vzorky před rozřezáním vybroušen daný počet rýh. Vzorky byly následně vyčištěny v ultrazvukové lázni Ultrasonic Cleaner CT-400C a vysušeny.

4.2.1 Upnutí vzorku

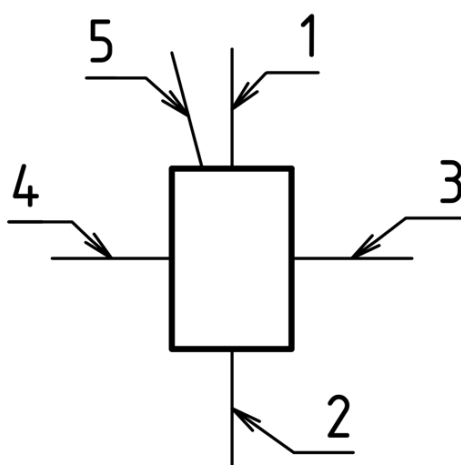
Pro dobrý odvod tepla z polotovaru byla vyrobena podložka z měděného kvádrů s vyfrézovanou drážkou pro usazení vzorku, která ležela na dalších dvou měděných kvádrech. Vše bylo upnuto kovovými upínkami na ocelový pracovní stůl navařovacího automatu (viz. *Obrázek 4*).



Obrázek 4: Detail upnutí polotovaru

4.2.2 Měření teploty

Na každém vzorku, s výjimkou prvního (na prvním vzorku byly navařeny pouze dva termočlánky bez ochrany – došlo k utavení), byly navařeny čtyři termočlánky, z každé obvodové strany jeden. Na termočlánky č. 1 a 2 byla navléknuta ochranná křemíková trubička, aby se zabránilo utavení, č. 3 a 4 byly chráněny kovovými upínkami. Dále byl použit termočlánek č. 5 v ochranné trubičce jako kontrolní. Ten byl pouze přiložen ze strany polotovaru, viz *Obrázek 4* a *Obrázek 5*.



Obrázek 5: Schéma termočlánků

4.3 Vstupní parametry

Vzhledem k vysokému počtu vstupních parametrů, jež lze navařovacímu automatu zadat, bylo před začátkem experimentu potřeba vybrat, které z nich budou proměnné, a které konstantní. Pro malý počet vzorků bylo rozhodnuto, že upravovat se bude pouze rychlost hořáku, velikost proudu a jeho frekvence. Všechny ostatní parametry se zachovají neměnné.

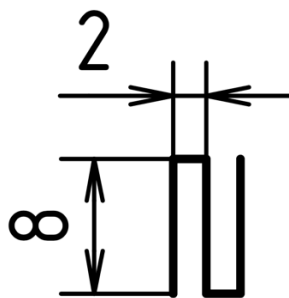
4.3.1 Konstantní parametry

Průtok procesních plynů byl na používaném zařízení již z minulosti optimálně nastaven, a to včetně podávacích plynů k prášku 1 a 2, které se do hořáku pouští i při absenci přídavného materiálu. Stejně tak bylo na základě zkušeností z minulých let nastaveno složení těchto plynů.

Tabulka 2: Tabulka nastavení procesních plynů

plyn	plazmový	ochranný	podávací 1 i 2
složení	Ar	Ar + 2 % H ₂	Ar + 2 % H ₂
průtok [l/min]	3,5	14	3

Dráha hořáku byla nastavena na 28 milimetrů (viz schéma níže) a jeho vzdálenost od vzorku na 10 mm.



Obrázek 6: Schéma dráhy hořáku

4.3.2 Proměnné parametry

Vzhledem k absenci jakéhokoli dřívějšího výzkumu plazmového přetavení wolframu nebyla vytvořena tabulka proměnných parametrů předem, ty se měnily vždy až po optickém zhodnocení předcházejícího vzorku. Jako směrodatný údaj pro změnu parametrů byl kromě optického hodnocení také ekvivalent vneseného tepla, který lze vyjádřit jako

$$Ekv = \frac{((t_H \cdot I_H) + (t_L \cdot I_L)) \cdot f}{v} \quad (4)$$

kde

t_H = horní čas [s]

I_H = horní proud [A]

t_L = dolní čas [s]

I_L = dolní proud [A]

f = frekvence [Hz]

v = rychlost hořáku [mm]

Tabulka 3: Tabulka proměnných parametrů pro přetavení nástřiku wolframu na ocelové podložce

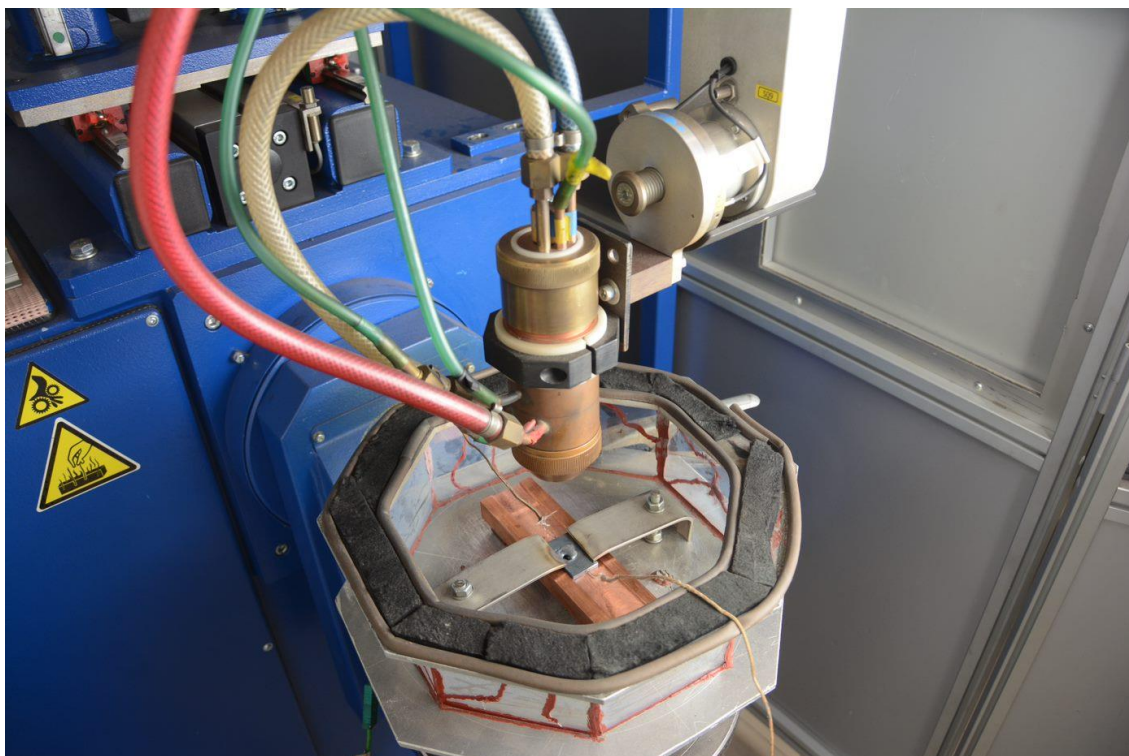
číslo vzorku	rychlost hořáku [mm/s]	pulz 1		pulz 2		frekvence [Hz]	I ekv. [A]	ekvivalent vneseného tepla [J/mm]
		t _{H1} [s]	I _{H1} [A]	t _{L2} [s]	I _{L2} [A]			
1	4	1	80	-	-	1	80,00	20,00
2	4	1	80	-	-	1	80,00	20,00
3	4	0,003	120	0,01	60	77	73,85	18,48
4	8	0,003	180	0,01	90	77	110,77	13,86
5	8	0,0025	150	0,0025	60	200	105,00	13,13
6	16	0,0025	150	0,0025	60	200	105,00	6,56
7	16	0,0025	170	0,0025	120	200	145,00	9,06
8	16	0,0025	160	0,0025	90	200	125,00	7,81
9	16	0,0025	170	0,0025	120	200	145,00	9,06
10	16	0,0025	180	0,0025	135	200	157,50	9,84
11	16	0,0025	160	0,0025	105	200	132,50	8,28
12	16	0,0025	170	0,0025	120	200	145,00	9,06

5 Výsledky a diskuze

5.1 Průběh experimentu

Před začátkem experimentu byly, pro vyzkoušení nastavení stroje a funkčnosti termočlánků, první navržené parametry vyzkoušeny na destičce z oceli o rozměrech podobných, jaké měly vzorky. Na oceli byly ze dvou protilehlých obvodových stran přivařeny termočlánky, viz *Obrázek 7*.

Kromě skutečnosti, že do destičky byla propálena díra, protože parametry byly nastaveny s ohledem na wolframový nástřik, vše fungovalo.



Obrázek 7: Detail upnutí zkušební destičky s přivařenými termočlánky

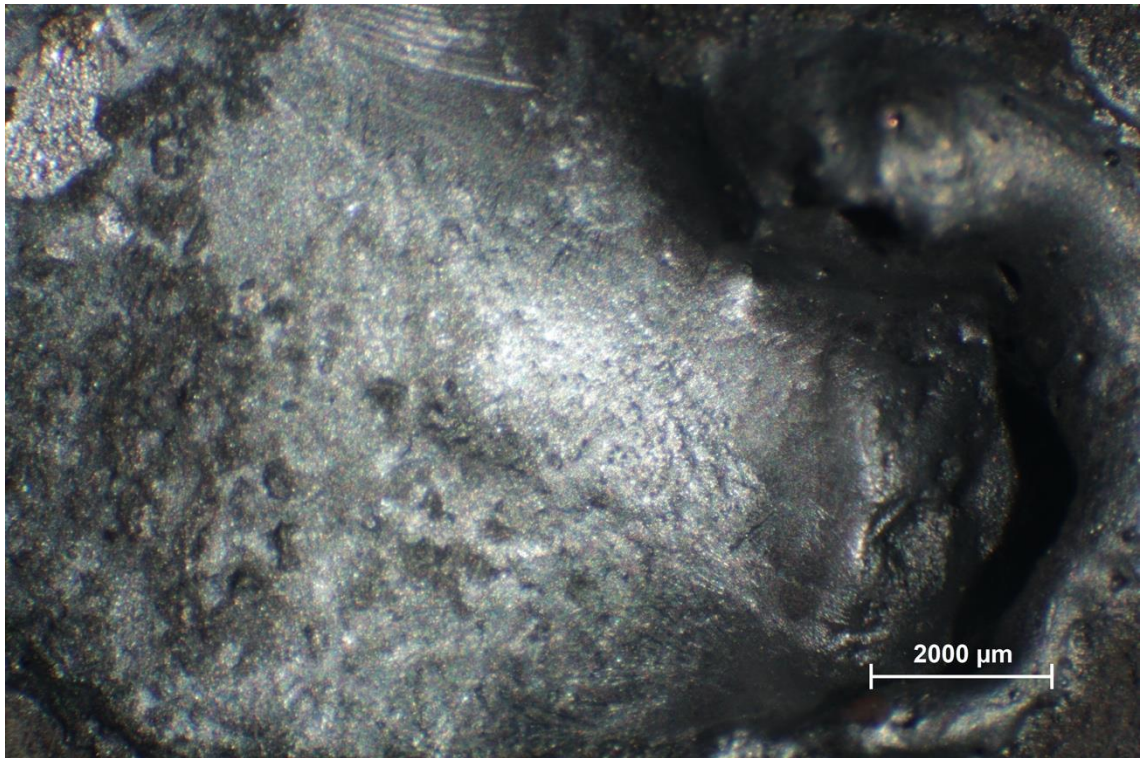
5.1.1 Vzorek č. 1

Pro první pokus o přetavení plazmového nástřiku wolframu na ocelové podložce byly zvoleny relativně nízké hodnoty rychlosti posuvu hořáku a velikosti proudu, frekvence byla ponechána konstantní. Termočlánky byly, stejně jako na zkušební destičce, na vzorku navařeny dva proti sobě.

Tabulka 4: Parametry přetavení pro vzorek č. 1

číslo vzorku	rychlost hořáku [mm/s]	pulz 1		pulz 2		frekvence [Hz]	I ekv. [A]	ekvivalent vneseného tepla [J/mm]
		t _{H1} [s]	I _{H1} [A]	t _{L2} [s]	I _{L2} [A]			
1	4	1	80	-	-	1	80,00	20,00

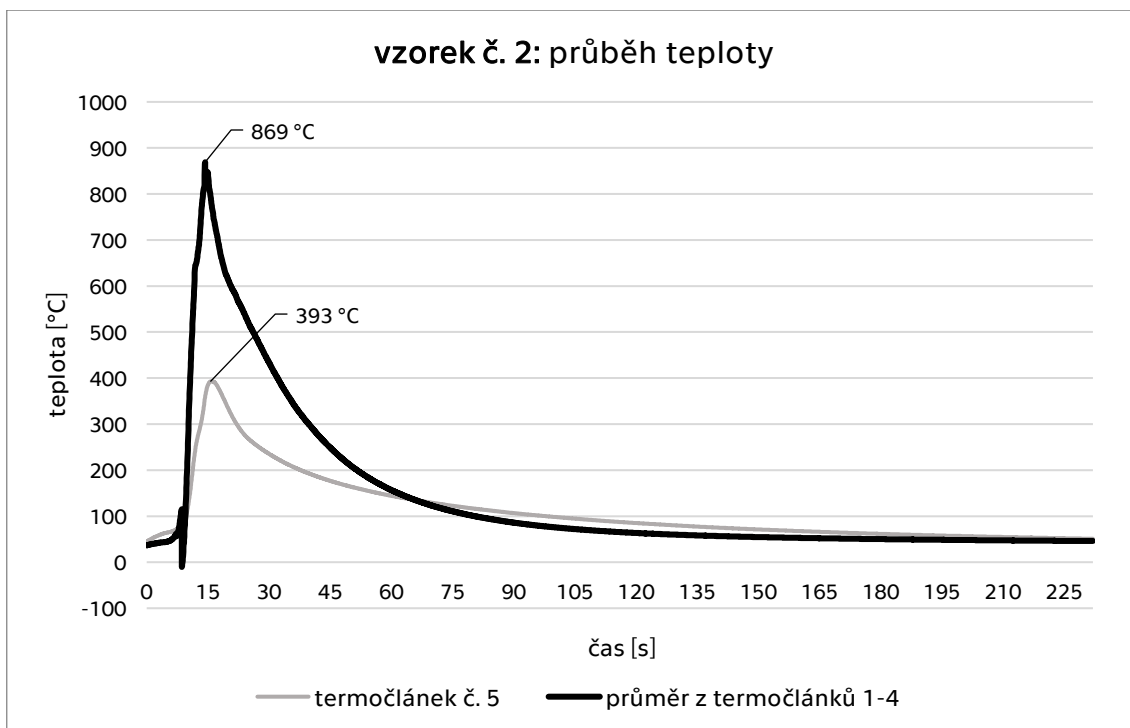
Termočlánky se vlivem vysoké teploty utavily. Na povrchu vzorku vzniknul kráter.



Obrázek 8: Přetavený povrch vzorku č. 1

5.1.2 Vzorek č. 2

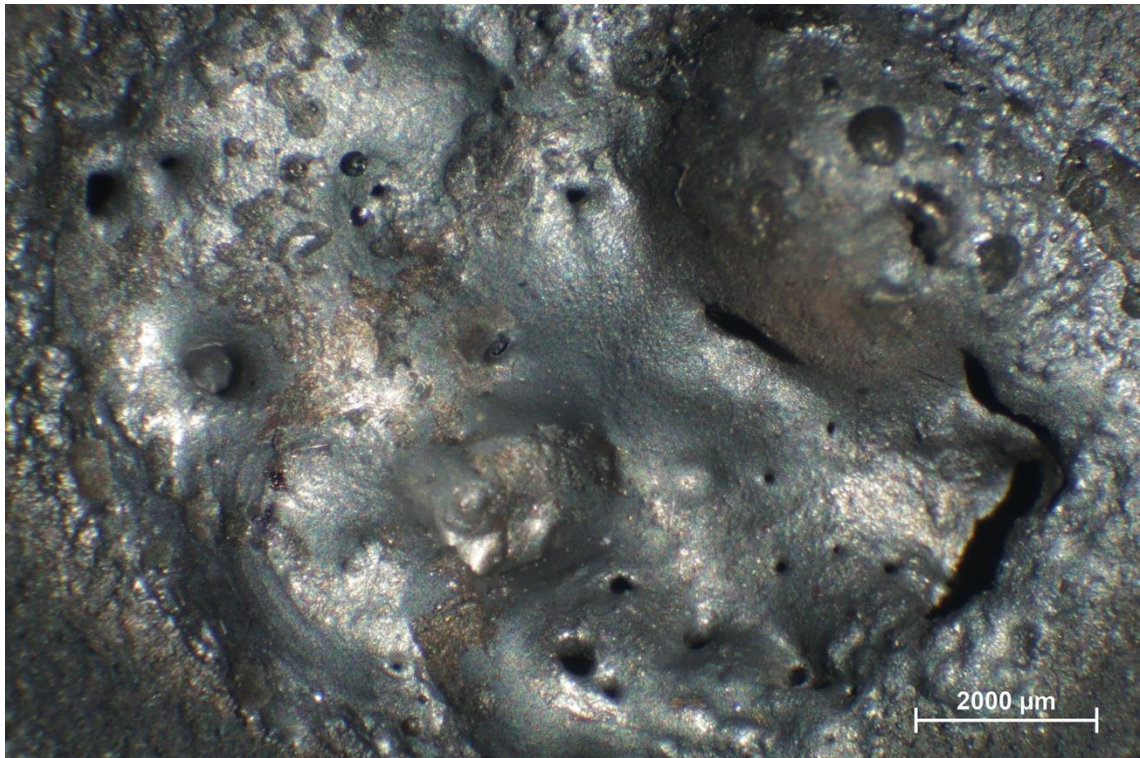
Z důvodu utavení termočlánků u vzorku č. 1, byly parametry u vzorku č. 2 zachovány, viz *Tabulka 4*. Na termočlánky č. 1 a 2 (viz *Obrázek 5*) byla na ochranu před teplem navlečena korundová trubička. Pro přesnější měření byly doplněny termočlánky č. 3 a 4 a jako pojistka pro případ utavení ještě termočlánek č. 5, který byl vsunut do zaslepené korundové trubičky a přiložen k povrchu vzorku (viz *Obrázek 4*).



Obrázek 9: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 2

Pozn.: Propad teploty přibližně v osmé sekundě grafu byl způsoben úderem vysoké frekvence při zapálení pilotního oblouku.

Při přetavení vzorku č. 2 se podkladová ocel začala tavit dříve než wolframový nástřík. Na prvním úseku dráhy hořáku se wolfram natavit nepodařilo, na druhém úseku byl wolfram sice nataven ale ocel v tu chvíli byla již nad teplotou tání. Výsledkem byly bubliny a díry na povrchu vzorku.



Obrázek 10: Přetavený povrch vzorku č. 2

5.1.3 Vzorek č. 3

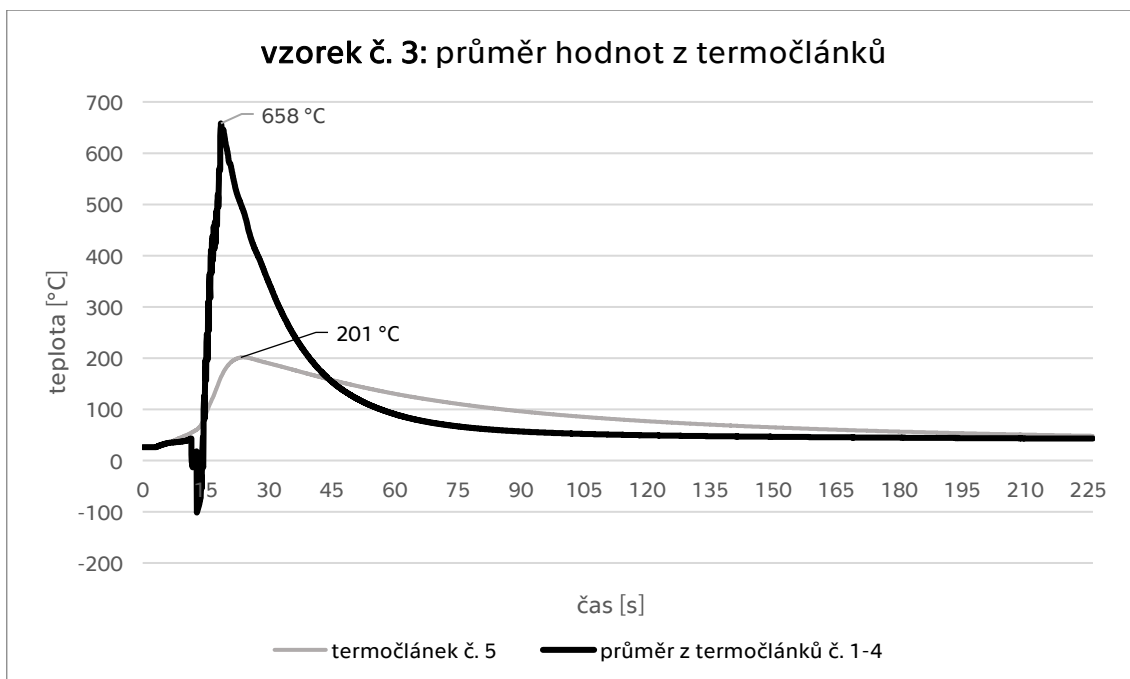
Z důvodu snahy o snížení tepelného ovlivnění materiálu, dosáhnutí menší deformace a zlepšení celistvosti, byl u vzorku č. 3 použit impulzní proud o hodnotách 120/60 A. Hodnota frekvence byla nastavena relativně nízko a to na 77 Hz.

Tabulka 5: Parametry přetavení pro vzorek č. 3

číslo vzorku	rychlost hořáku [mm/s]	pulz 1		pulz 2		frekvence [Hz]	I ekv. [A]	ekvivalent vneseného tepla [J/mm]
		t _{H1} [s]	I _{H1} [A]	t _{L2} [s]	I _{L2} [A]			
3	4	0,003	120	0,01	60	77	73,85	18,48

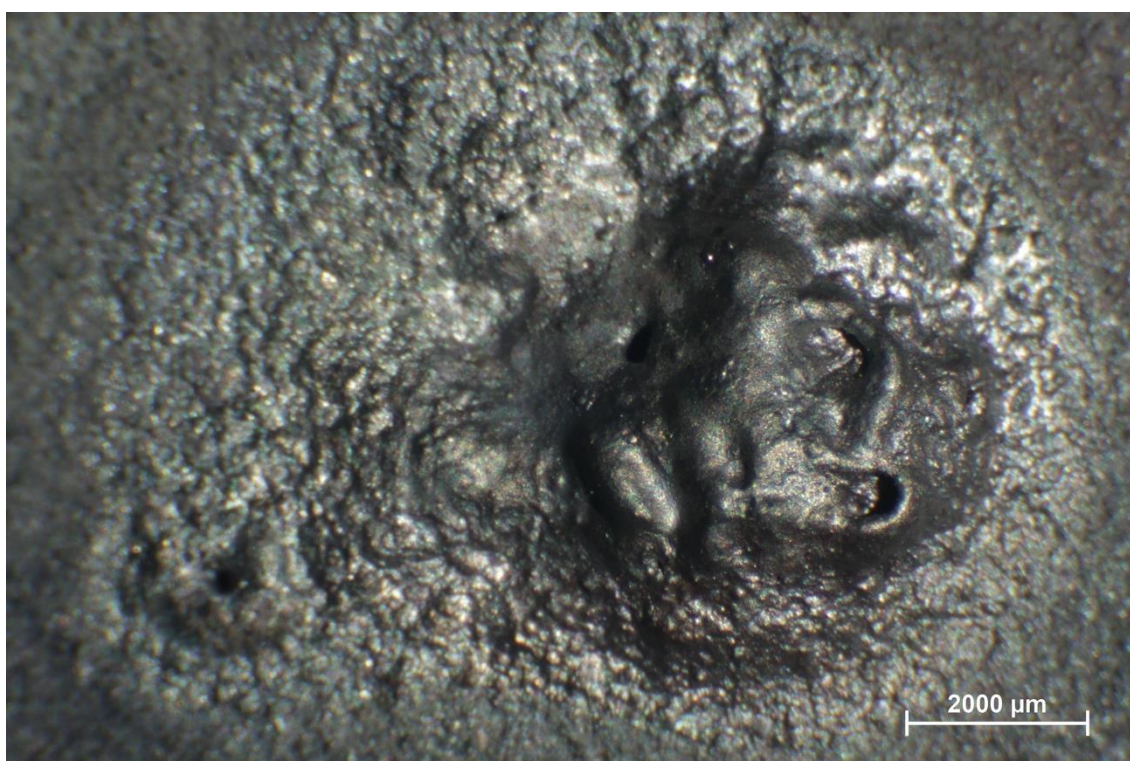
Na prvním a druhém úseku dráhy hořáku se wolframový nástřík vůbec netavil. Na třetím úseku začalo docházet k napěňování nástříku vlivem úniku plynů z porozity.

Výsledek byl stále porézni a vlivem napěnění hrboletý.



Obrázek 11: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 3

Pozn.: Propad teploty přibližně ve dvanácté sekundě grafu byl způsoben úderem vysoké frekvence při zapálení pilotního oblouku.



Obrázek 12: Přetavený povrch vzorku č. 3

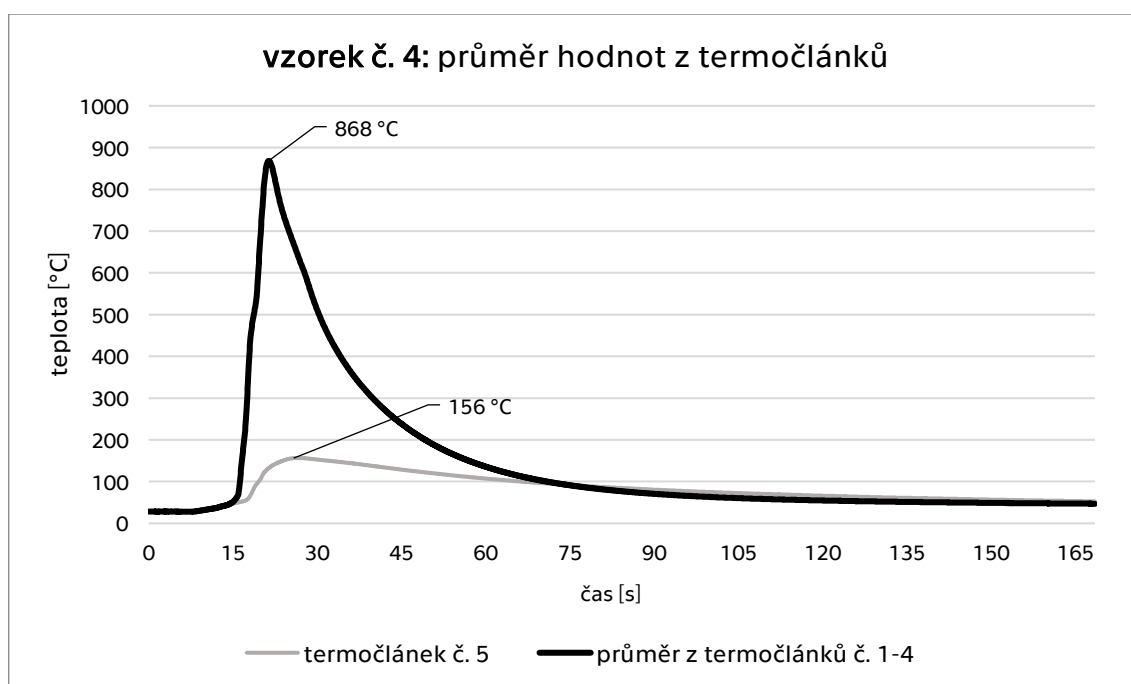
5.1.4 Vzorek č. 4

Protože nástřik u vzorku č. 3 nebyl ze začátku vůbec nataven, byl u vzorku č. 4 zvolen vyšší proud o hodnotách 180/90 A. Pro zabránění napěnění a tavení podkladové oceli dřív než wolframu, byla rychlost hořáku zvýšena na 8 mm/s a tím sníženo vnesené teplo.

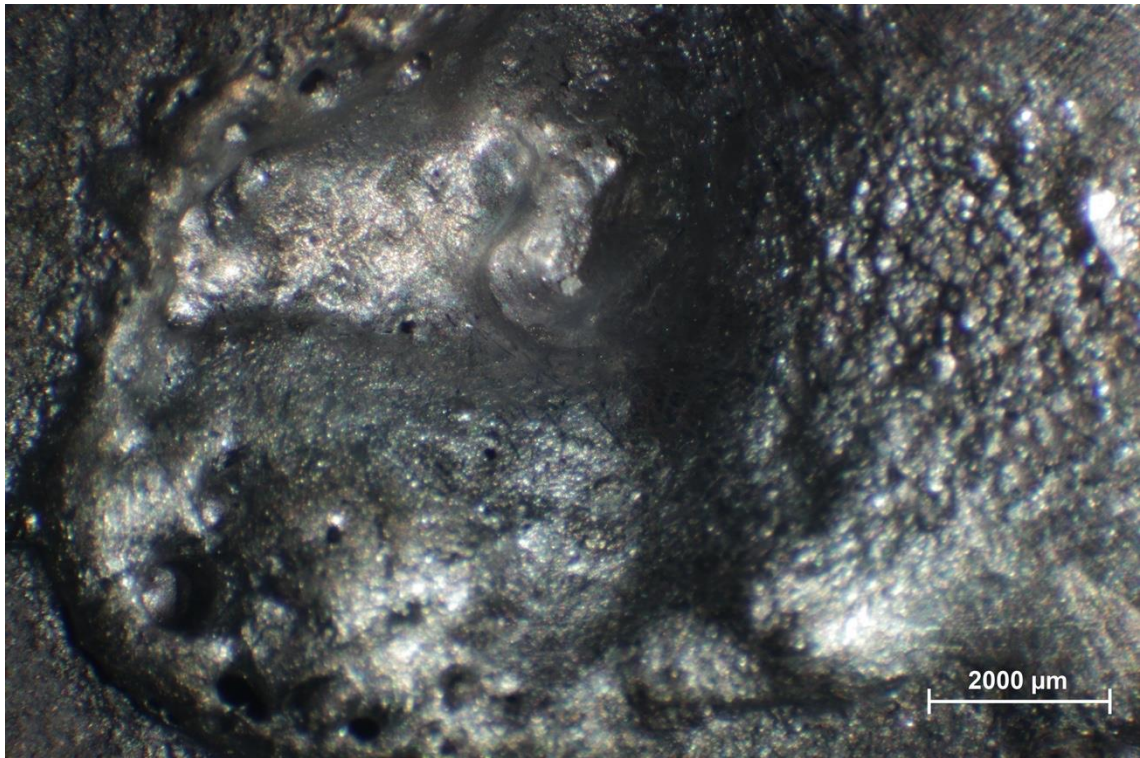
Tabulka 6: Parametry přetavení pro vzorek č. 4

číslo vzorku	rychlost hořáku [mm/s]	pulz 1		pulz 2		frekvence [Hz]	I ekv. [A]	ekvivalent vneseného tepla [J/mm]
		t _{H1} [s]	I _{H1} [A]	t _{L2} [s]	I _{L2} [A]			
4	8	0,003	180	0,01	90	77	110,77	13,86

Zvýšení hodnot proudu skutečně vedlo k dřívějšímu natavení wolframu. Vnesené teplo bylo ale stále příliš vysoké, a proto se ocel opět začala tavit dříve než nástřik. Na povrchu tak znovu vznikly bubliny a díry.



Obrázek 13: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 4



Obrázek 14: Přetavený povrch vzorku č. 4

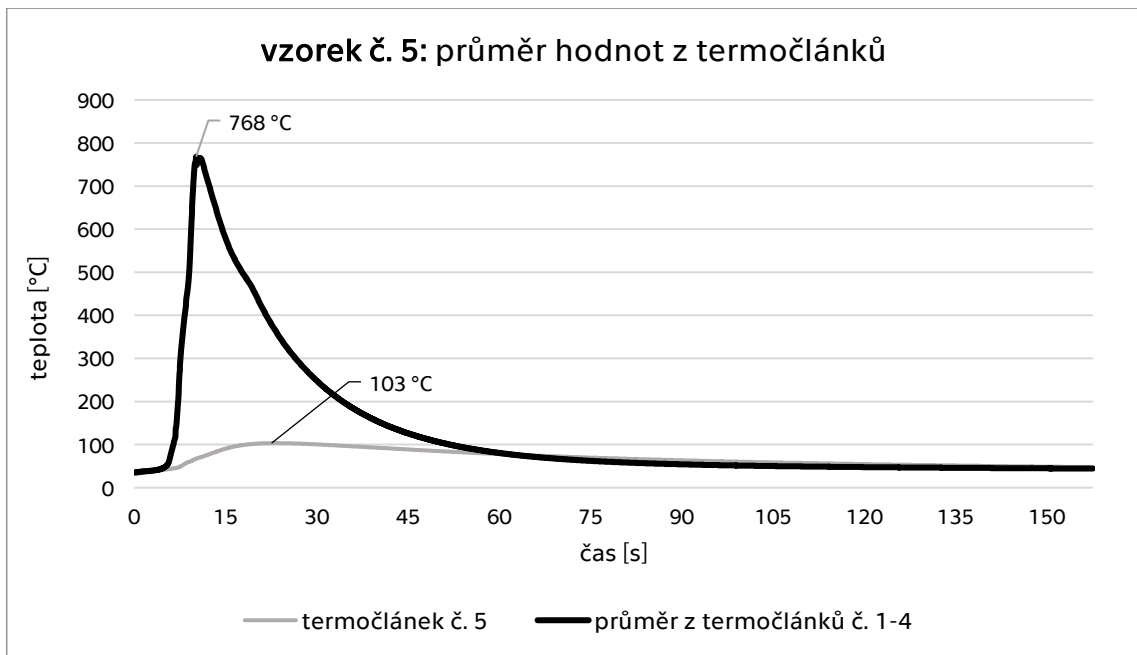
5.1.5 Vzorek č. 5

U vzorku č. 5 byl pro snížení vneseného tepla proud opět o něco zmenšen, a to na hodnotu 150/60 A. Ze stejného důvodu byla frekvence proudu zvýšena na 200 Hz, což mělo mít za následek také zlepšení homogenity a kvality povrchu.

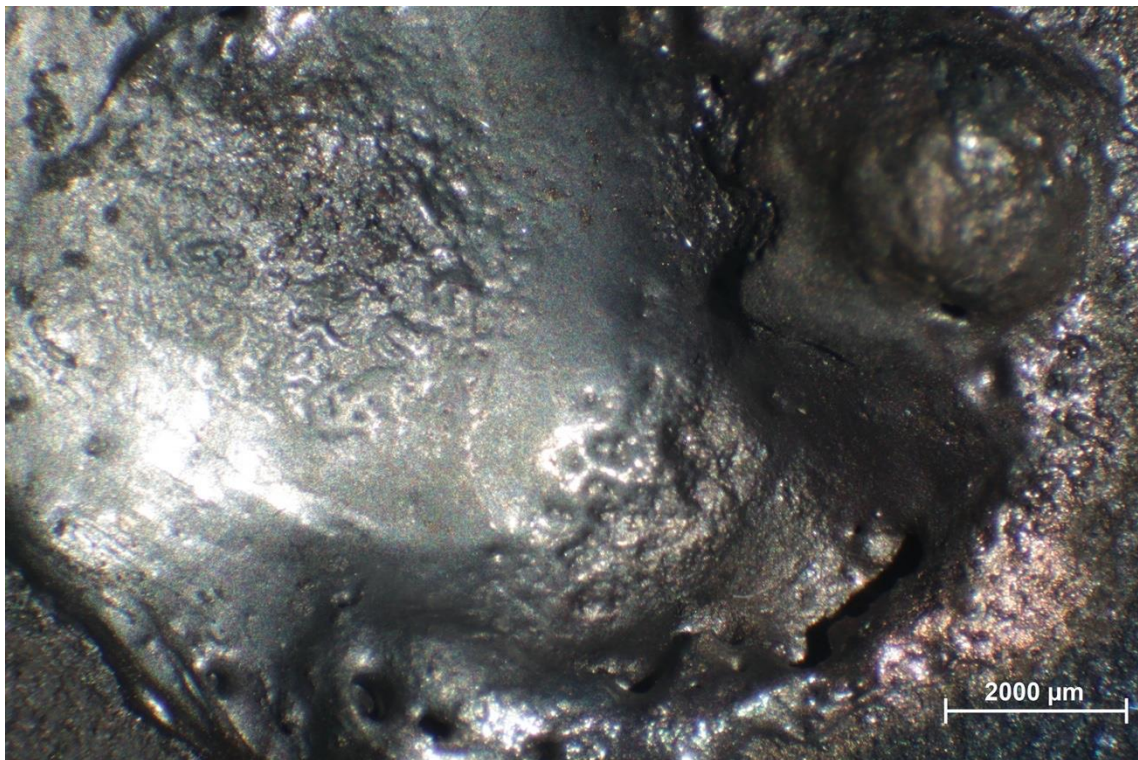
Tabulka 7: Parametry přetavení pro vzorek č. 5

číslo vzorku	rychlost hořáku [mm/s]	pulz 1		pulz 2		frekvence [Hz]	I ekv. [A]	ekvivalent vneseného tepla [J/mm]
		t _{H1} [s]	I _{H1} [A]	t _{L2} [s]	I _{L2} [A]			
5	8	0,0025	150	0,0025	60	200	105,00	13,13

Kvalita povrchu se se zvýšením proudu a frekvence opravdu ukázala být lepší. Vnesené teplo bylo stále příliš vysoké a na vzorku v důsledku roztavení oceli vzniknul kráter.



Obrázek 15: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 5



Obrázek 16: Přetavený povrch vzorku č. 5

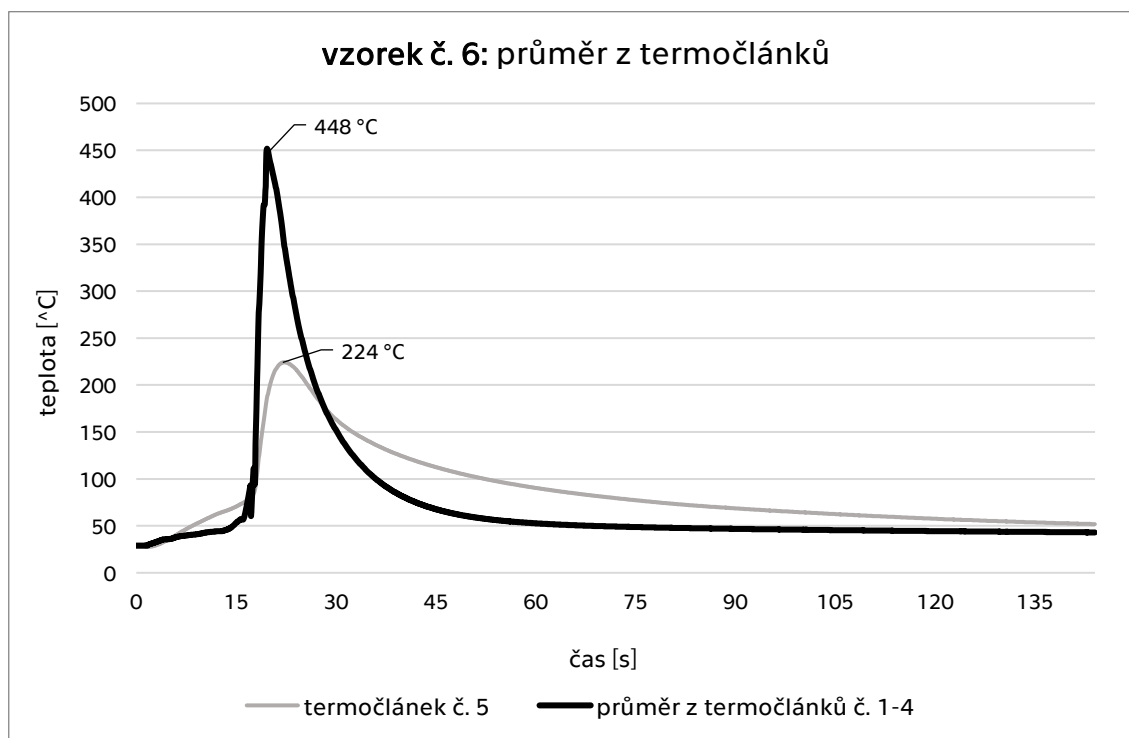
5.1.6 Vzorek č. 6

Pro snížení vneseného tepla a zabránění tak tavení oceli dříve než wolframu, byla u vzorku č. 6 výrazně zvýšena rychlost hořáku na 16 mm /s.

Tabulka 8: Parametry přetavení pro vzorek č. 6

číslo vzorku	rychlost hořáku [mm/s]	pulz 1		pulz 2		frekvence [Hz]	I ekv. [A]	ekvivalent vneseného tepla [J/mm]
		t _{H1} [s]	I _{H1} [A]	t _{L2} [s]	I _{L2} [A]			
6	16	0,0025	150	0,0025	60	200	105,00	6,56

Vnesené teplo se sice zrychlením posuvu hořáku podařilo snížit a podkladová ocel se nezačala tavit, wolfram ale zároveň nebyl dostatečně nataven. Na prvním úseku dráhy se povrch netavil vůbec.



Obrázek 17: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 6



Obrázek 18: Přetavený povrch vzorku č. 6

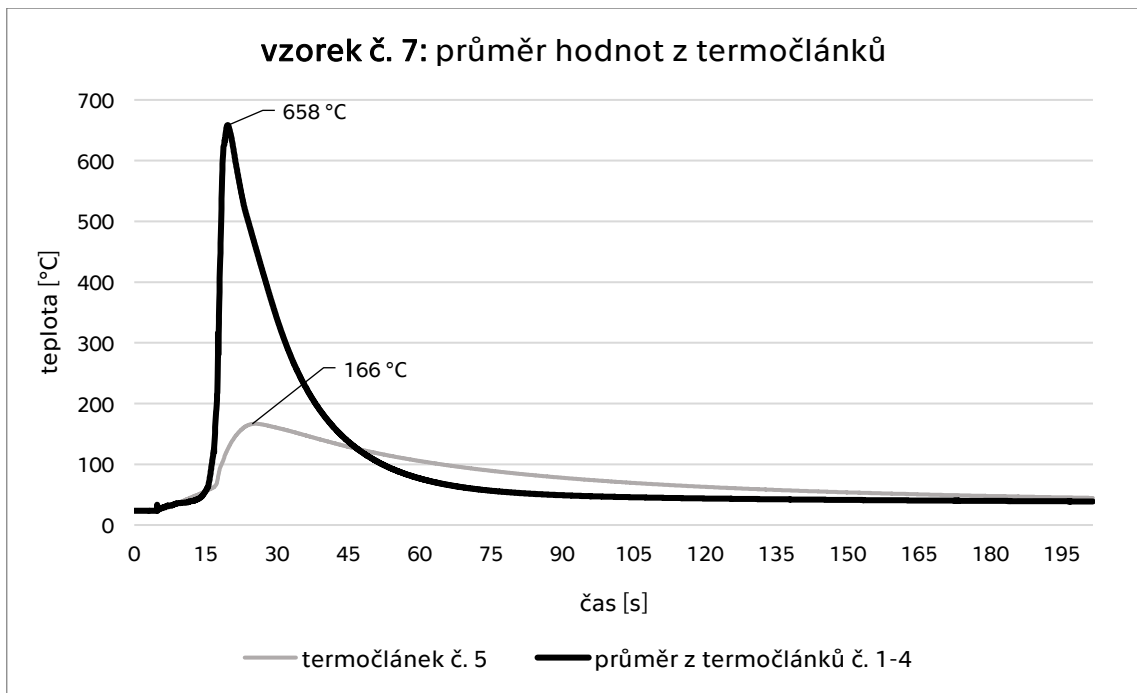
5.1.7 Vzorek č. 7

Vzhledem k tomu, že se u předchozího vzorku wolfram skoro nenatavil, byla u vzorku č. 7 zvýšena hodnota proudu na 170/120.

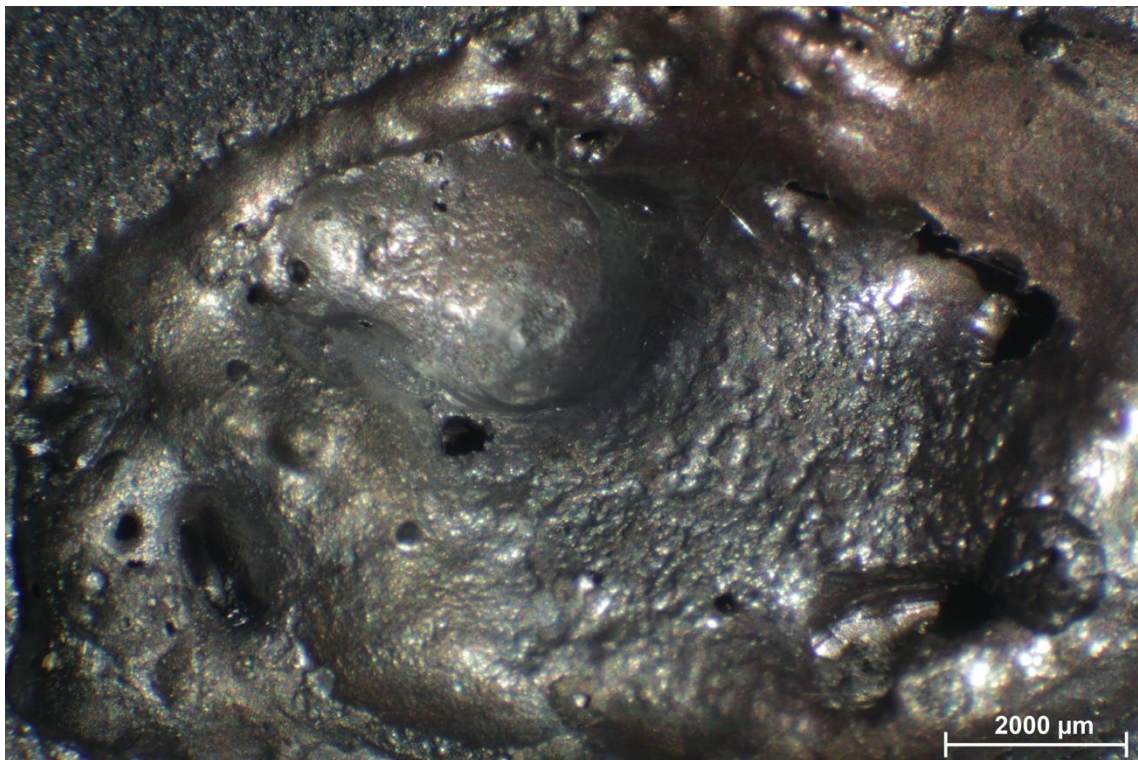
Tabulka 9: Parametry přetavení pro vzorek č. 7

číslo vzorku	rychlost hořáku [mm/s]	pulz 1		pulz 2		frekvence [Hz]	I ekv. [A]	ekvivalent vneseného tepla [J/mm]
		t _{H1} [s]	I _{H1} [A]	t _{L2} [s]	I _{L2} [A]			
7	16	0,0025	170	0,0025	120	200	145,00	9,06

Tento proud byl již příliš vysoký povrch vzorku se protavil a vznikly díry a bubliny.



Obrázek 19: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 7



Obrázek 20: Přetavený povrch vzorku č. 7

5.1.8 Vzorek č. 8

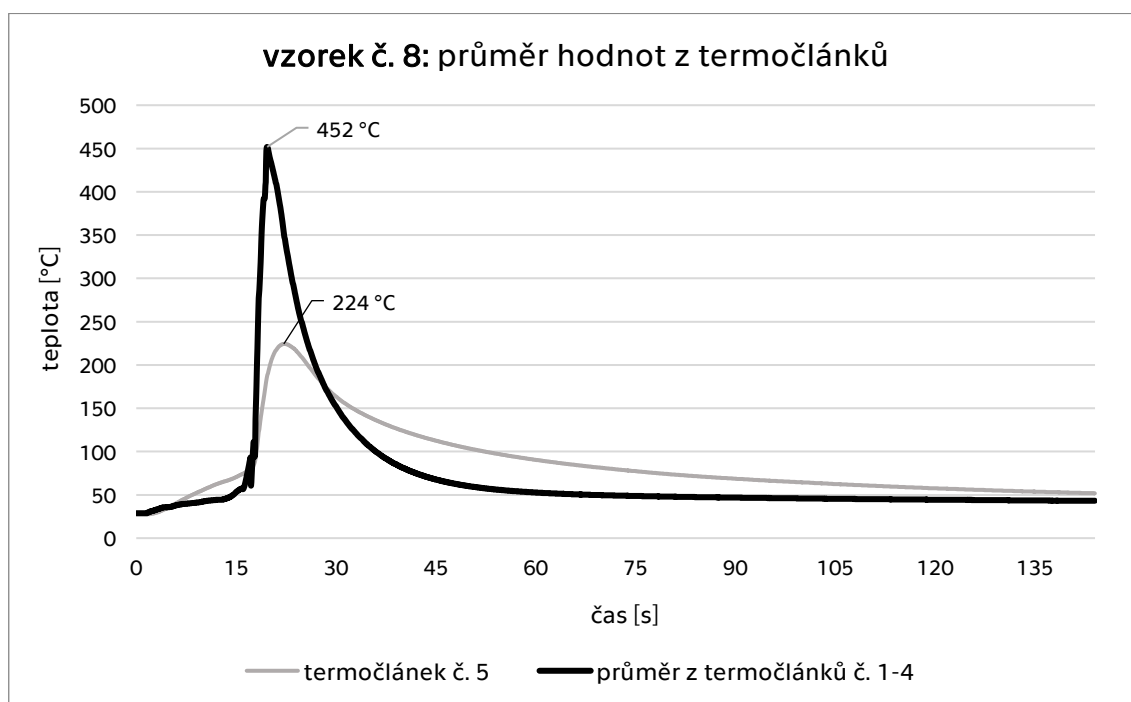
Aby polotovar více dosednul na měděnou podložku a teplo bylo lépe odváděno, byla u vzorku č. 8 poprvé obroušena spodní strana. Vzhledem k výsledku předchozího přetavení, byla hodnota proudu snížena na 160/90 A.

Tabulka 10: Parametry přetavení pro vzorek č. 8

číslo vzorku	rychlost hořáku [mm/s]	pulz 1		pulz 2		frekvence [Hz]	I ekv. [A]	ekvivalent vneseného tepla [J/mm]
		t _{H1} [s]	I _{H1} [A]	t _{L2} [s]	I _{L2} [A]			
8	16	0,0025	160	0,0025	90	200	125,00	7,81

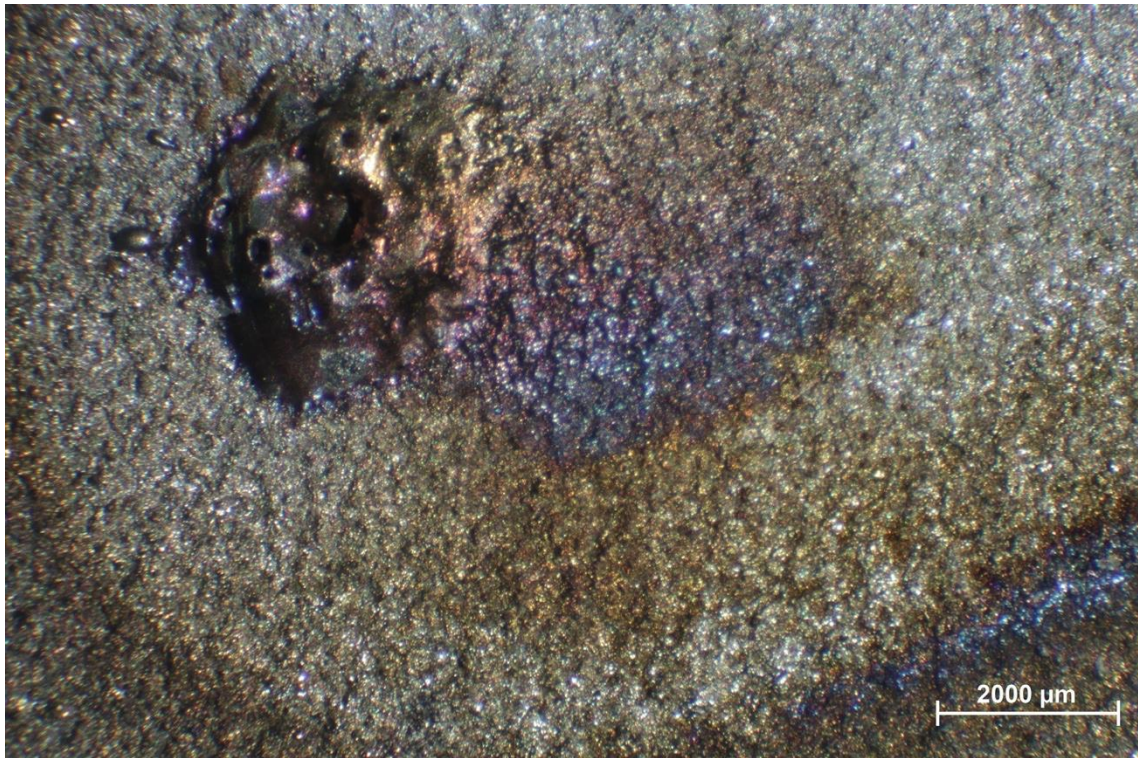
Protože byl polotovar obroušen a teplo oproti předchozím vzorkům skrze měděnou podložku odvedeno lépe, povrch se skoro vůbec nenatavil.

Po této zkušenosti bylo přistoupeno k obroušení spodních stran všech zbývajících vzorků.



Obrázek 21: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 8

Na grafu průběhu teploty lze vidět, že průměr maximálních dosažených teplot, ze všech termočlánků byl 452 °C. To je poloviční hodnota oproti některým předchozím vzorkům.



Obrázek 22: Přetavený povrch vzorku č. 8

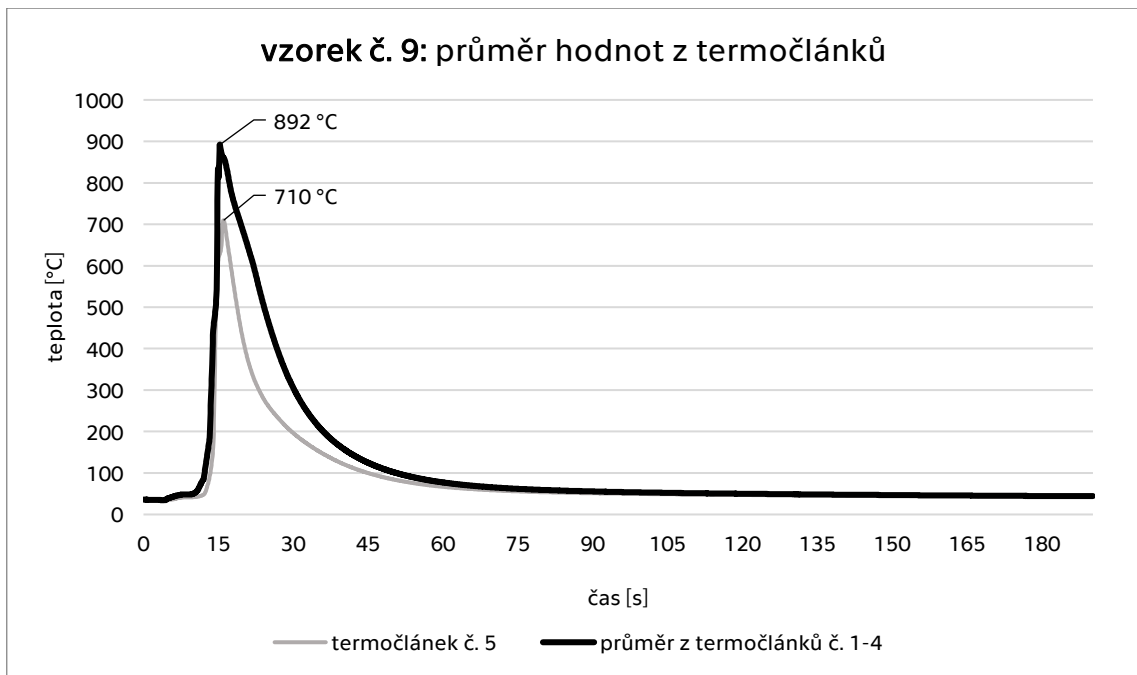
5.1.9 Vzorek č. 9

Jak již bylo zmíněno dříve, spodní strana vzorku č. 9 byla pro lepší odvod tepla před přetavením obroušena. Na základě výsledků z předchozího pokusu, kdy se wolfram skoro nenatavil, byl proud znovu zvýšen na stejnou hodnotu jako u vzorku č. 7, který byl pro špatný kontakt s měděnou podložkou neúspěšný.

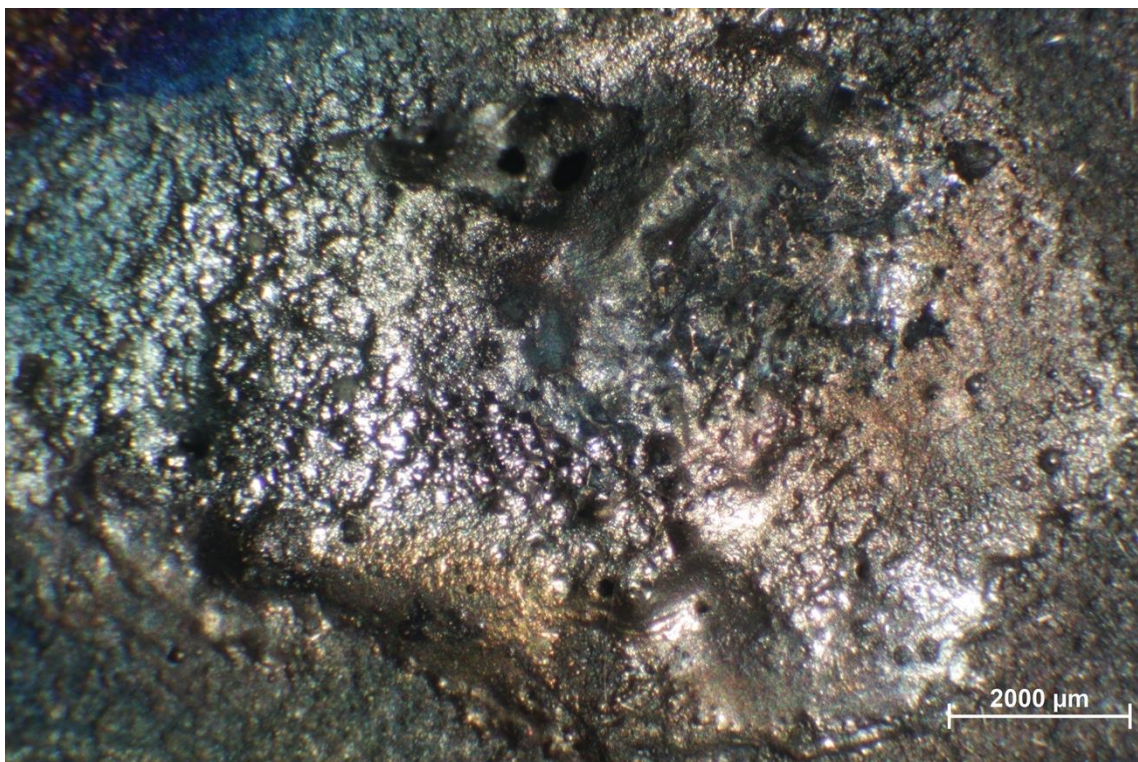
Tabulka 11: Parametry přetavení pro vzorek č. 9

číslo vzorku	rychlost hořáku [mm/s]	pulz 1		pulz 2		frekvence [Hz]	I ekv. [A]	ekvivalent vneseného tepla [J/mm]
		t_{H1} [s]	I_{H1} [A]	t_{L2} [s]	I_{L2} [A]			
9	16	0,0025	170	0,0025	120	200	145,00	9,06

Tyto parametry měly zatím nejlepší výsledek. Ocel se nezačala tavit dříve než wolfram a nástřík se natavoval již od prvního úseku dráhy hořáku. Došlo ke zlepšení homogenity povrchu.



Obrázek 23: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 9



Obrázek 24: Přetavený povrch vzorku č. 9

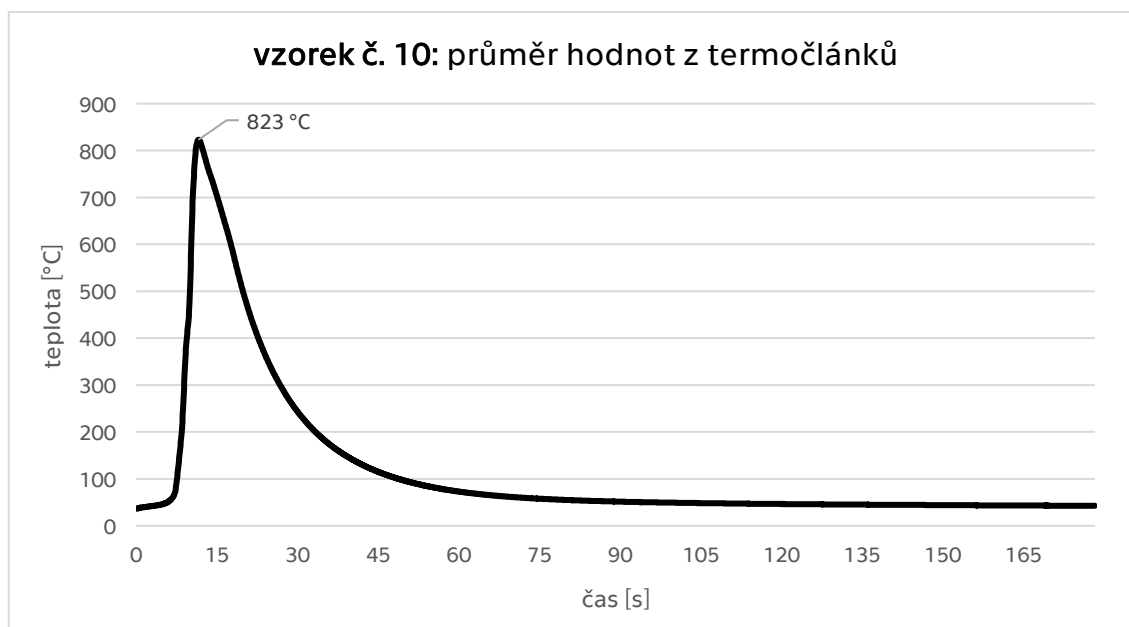
5.1.10 Vzorek č. 10

Protože bylo předchozí přetavení nástřiku relativně úspěšné, bylo u tohoto vzorku rozhodnuto zvýšit hodnotu proudu a u následujícího ji o stejnou hodnotu zase snížit. V úvahu také přicházelo změnit rychlost hořáku, ale pro nedostatek vzorků musel být vybrán pouze jeden parametr. Proud byl vybrán právě proto, že jeho velikost zdánlivě nejvýrazněji ovlivňuje výsledek. Spodní strana vzorku byla obroušena.

Tabulka 12: Parametry přetavení pro vzorek č. 10

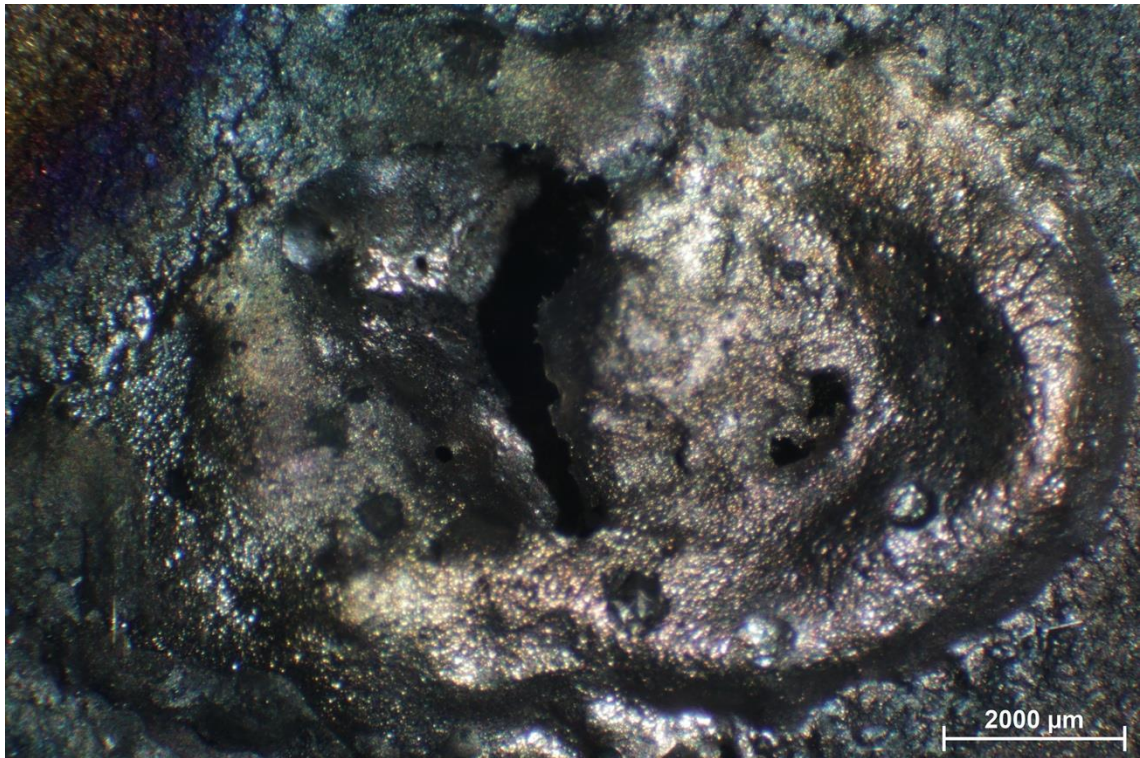
číslo vzorku	rychlost hořáku [mm/s]	pulz 1		pulz 2		frekvence [Hz]	I ekv. [A]	ekvivalent vneseného tepla [J/mm]
		t _{H1} [s]	I _{H1} [A]	t _{L2} [s]	I _{L2} [A]			
10	16	0,0025	180	0,0025	135	200	157,50	9,84

Jak lze vidět na fotce níže, tyto hodnoty proudu byly již příliš vysoké. Na povrchu se tvořily díry a prohlubně.



Obrázek 25: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 10

Pozn.: Termočlánek č. 1 byl u vzorku č. 10 nejspíše vlivem špatného přivaření a vysoké teploty upálen. Termočlánek č. 5 byl špatně přiložen a neměřil. Průměr teplot je složen pouze z dat zbývajících tří termočlánků.



Obrázek 26: Přetavený povrch vzorku č. 10

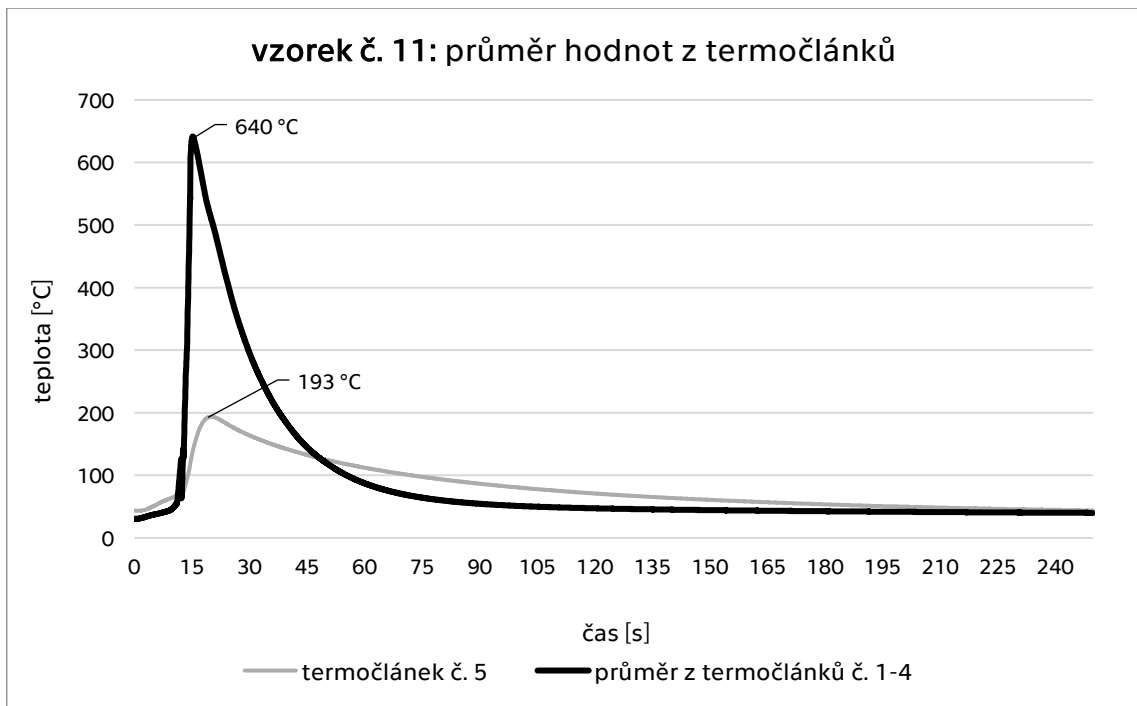
5.1.11 Vzorek č. 11

Jak již bylo zmíněno, proud byl tentokrát oproti vzorku č. 9 snížen o stejnou hodnotu, o jakou byl u vzorku č. 10 zvýšen, a to na 160/105 A.

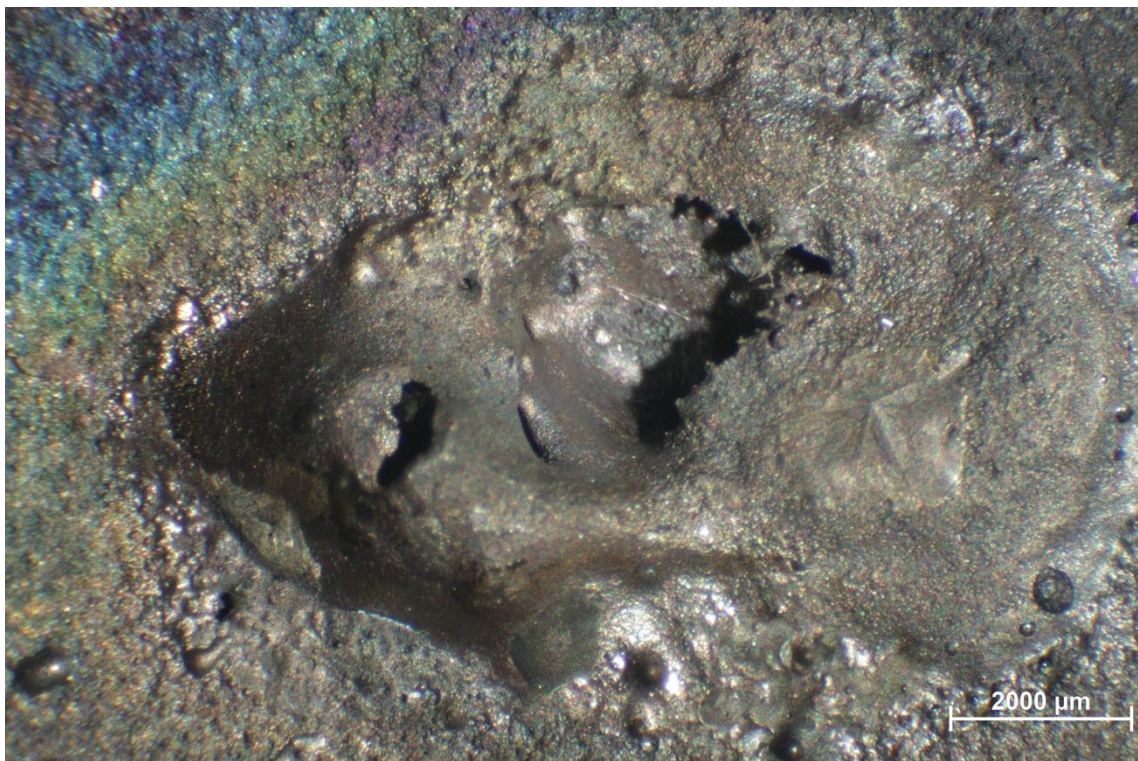
Tabulka 13: Parametry přetavení pro vzorek č. 11

číslo vzorku	rychlost hořáku [mm/s]	pulz 1		pulz 2		frekvence [Hz]	I ekv. [A]	ekvivalent vneseného tepla [J/mm]
		t _{H1} [s]	I _{H1} [A]	t _{L2} [s]	I _{L2} [A]			
11	16	0,0025	160	0,0025	105	200	132,50	8,28

Výsledkem byly, kromě špatného natavení wolframu na prvním úseku dráhy, díry na povrchu vzorku.



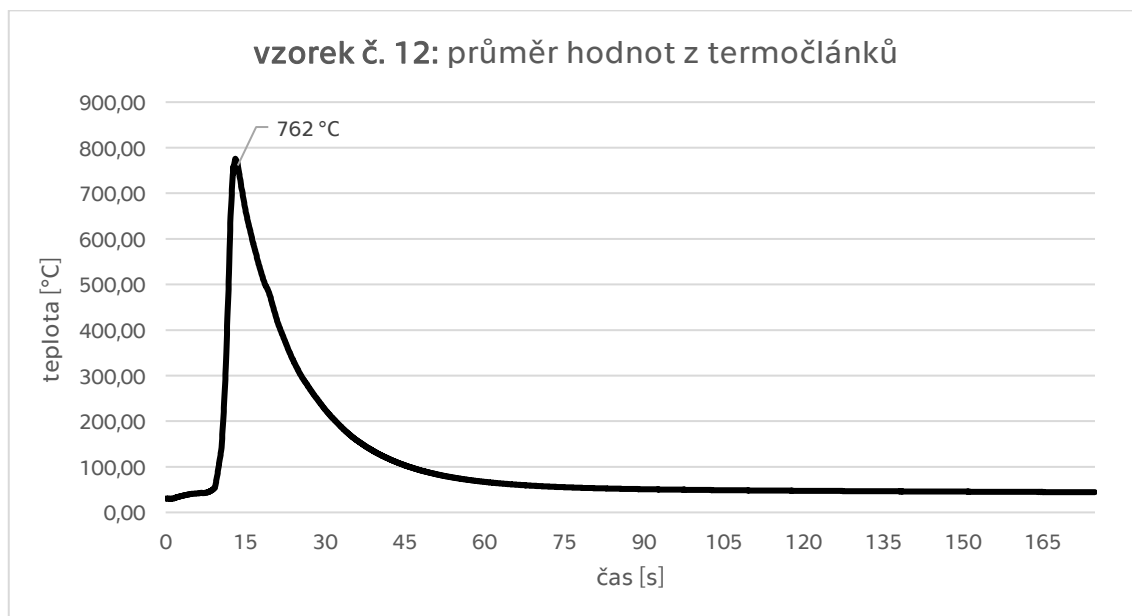
Obrázek 27: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 11



Obrázek 28: Přetavený povrch vzorku č. 11

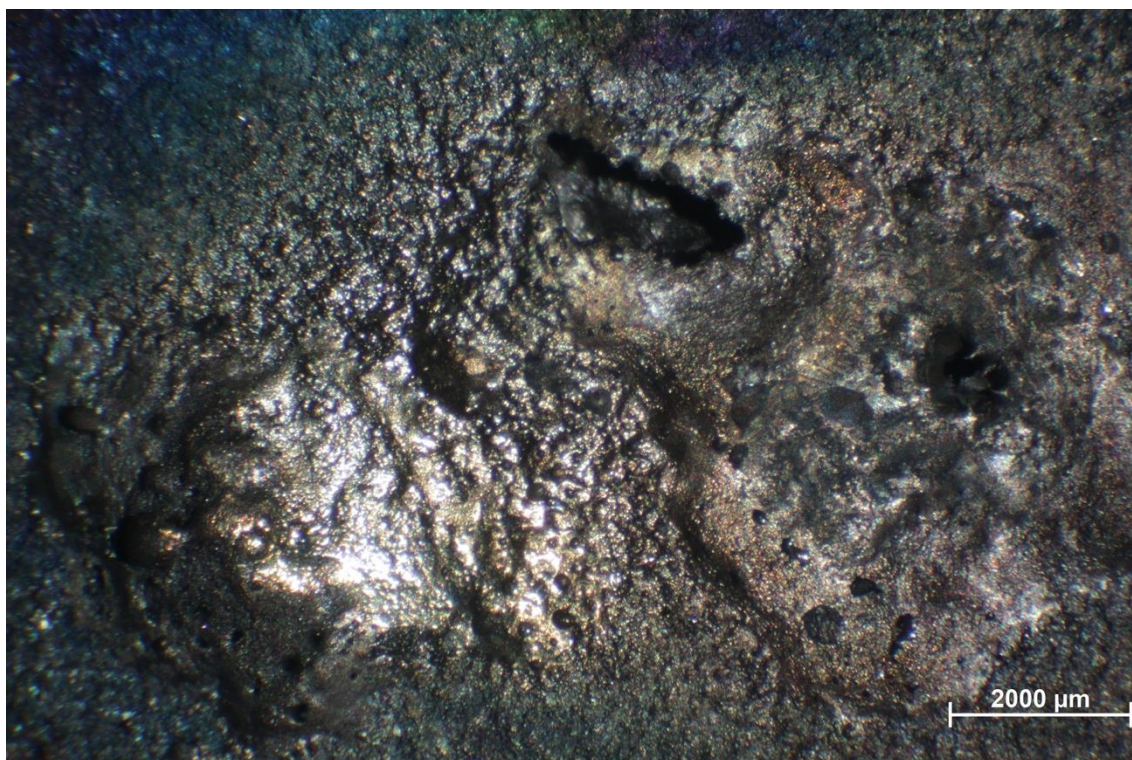
5.1.12 Vzorek č. 12

Ukázalo se, že parametry zvolené pro vzorek č. 9 byly nejlepší. Pro potvrzení výsledku bylo přetavení se stejnými hodnotami (viz *Tabulka 11*) provedeno znovu na posledním vzorku.



Obrázek 29: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 12

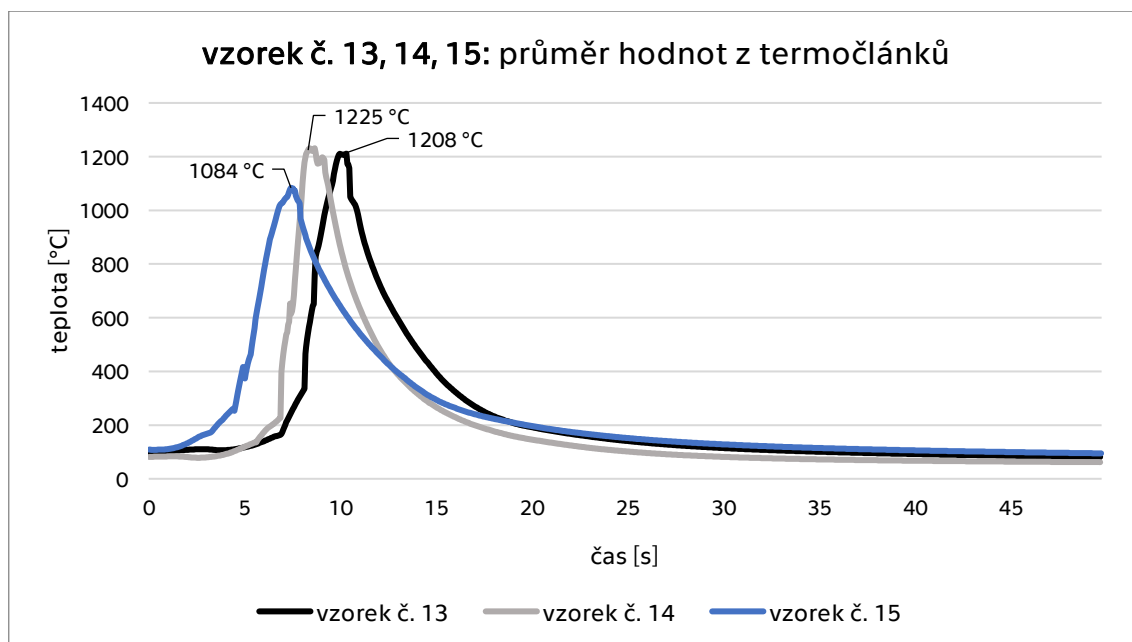
Pozn.: Termočlánek č. 5 byl špatně přiložen a neměřil.



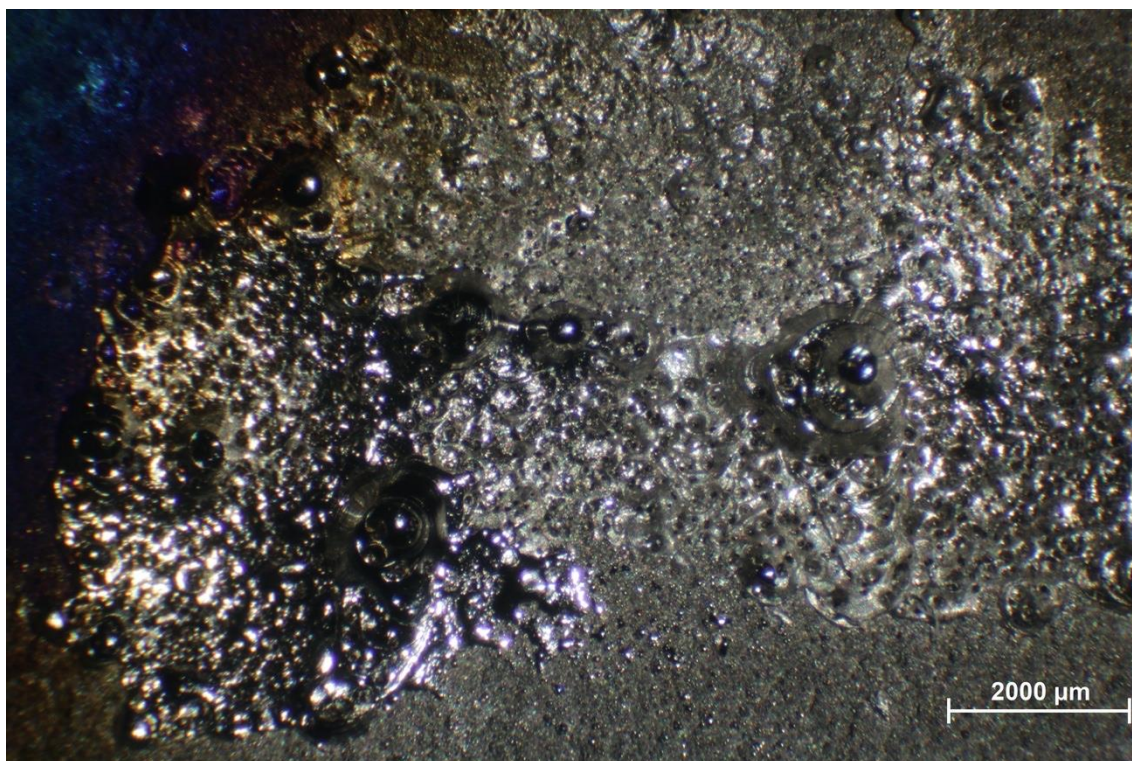
Obrázek 30: Přetavený povrch vzorku č. 12

5.1.13 Vzorky č. 13, 14, 15

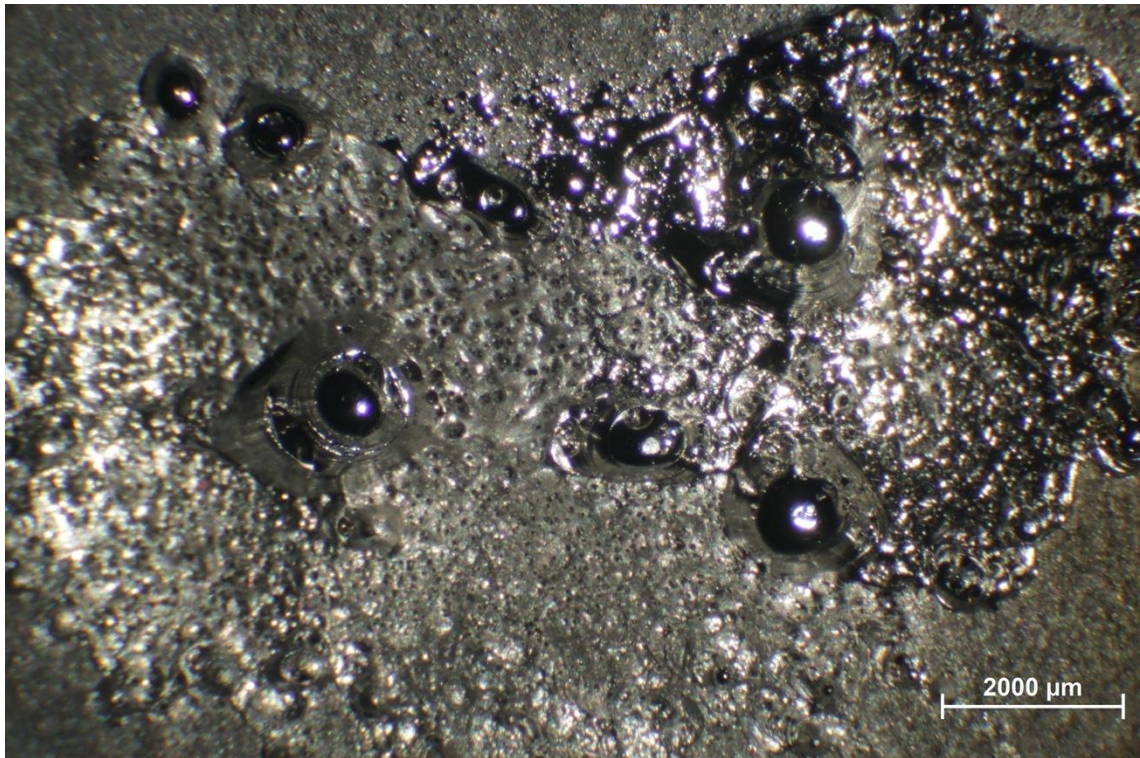
Tyto vzorky byly samonosné plazmové nástřiky wolframu o tloušťce 4,1 mm. Byly pro ně použity stejné parametry jako pro vzorky č. 10, 11 a 12.



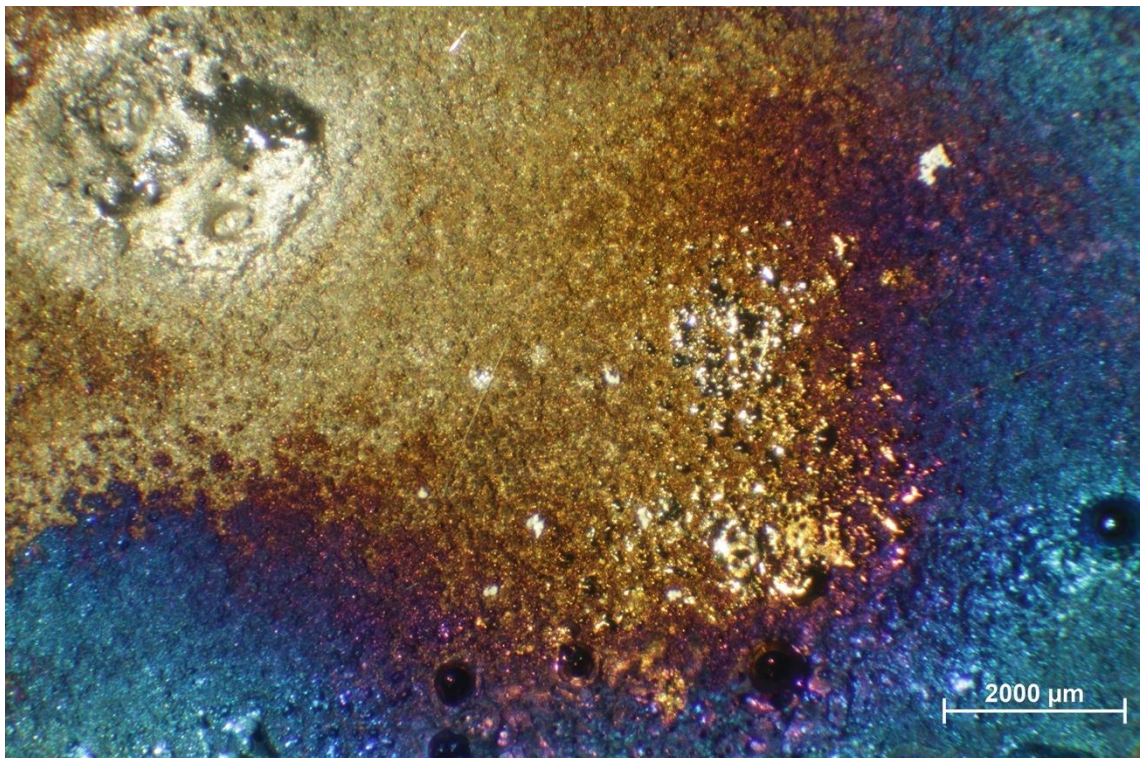
Obrázek 31: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 13, 14, 15



Obrázek 32: Přetavený povrch vzorku č. 13



Obrázek 33: Přetavený povrch vzorku č. 14



Obrázek 34: Přetavený povrch vzorku č. 15

U těchto vzorků odpadá problém s natavováním podkladové oceli a teplo je zde odváděno výrazně lépe.

5.2 Diskuse výsledků

K porovnání a metalografickým výbrusům bylo vybráno 5 vzorků.

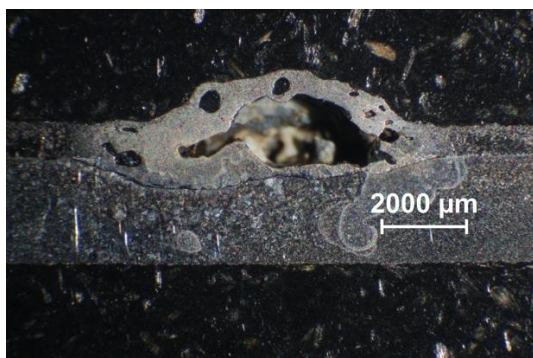
Lze říci, že nejlepším postupem pro přetavení plazmového nástřiku wolframu na ocelové podložce je zvolit vysoký proud a vysokou rychlost posuvu hořáku, aby vnesené teplo bylo relativně malé. Je-li vnesené teplo příliš vysoké, podložka se začne tavit mnohem dříve než wolfram. Následkem je tvorba bublin a děr na povrchu.

U vzorku č. 2 ještě nebyla použita frekvence a ekvivalent vneseného tepla byl nejvyšší ze všech.



Obrázek 35: Řez vzorkem č. 2

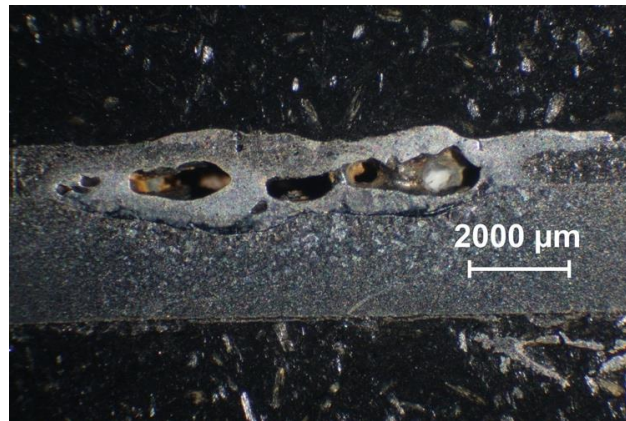
U vzorku č. 3 již frekvence byla použita, její hodnota však byla stále příliš nízká. Povrch se ze začátku vůbec nenatavil a ve chvíli kdy se tavit začal, už se ocel vypařovala a vlivem těchto par se pod povrchem vytvořila kapsa.



Obrázek 36: Řez vzorkem č. 3

Již z fotografií z mikroskopu lze vidět, že u vzorku č. 9 a č. 12 je i přes stejné vstupní parametry výsledek přetavení odlišný. Podobně odlišný výsledek můžeme pozorovat na vzorku č. 1 a č. 2, jejichž vstupní parametry byly také stejné, byť vizuálně hodnocené jako neúspěšné. Pro zajištění opakovatelnosti výsledků by bylo

pravděpodobně potřeba zajistit definovaný přestup tepla mezi podkladovou ocelí pod nástřikem a podložkou na stole zařízení. Lze předpokládat, že při velkoplošném přetavení pro použití v tokamacích bude třeba definovat přestup tepla ještě precizněji. Pro ověření by bylo potřeba více vzorků, které nebyly k dispozici.



Obrázek 37: Řez vzorkem č. 9



Obrázek 38: Řez vzorkem č. 12

Jediným rozdílem mezi vzorky č. 7 a č. 9 bylo obroušení spodní strany. Teplo bylo u vzorku č. 9 odvedeno mnohem lépe a podkladová ocel se nezačala tavit, tudíž se nevytvořila prohlubeň a wolfram nebyl natlačen na stranu tak jako u vzorku č. 7.



Obrázek 39: Řez vzorkem č. 7

Na metalografických řezech lze vidět, že se u všech vzorků pod povrchem vytvořily bubliny. A to včetně vzorku č. 9, jehož povrch se opticky zdá být jednolité. To může být způsobeno únikem plynů z porozity nástřiku, případně parami odpařené oceli.

6 Závěr

Byla provedena literární rešerše, ve které byl shrnut princip termojaderné fúze a uzavřených plazmových nádob typu tokamak. Byly v ní definovány požadavky na materiály vhodné k vystavení působení plazmatu a technologie jejich výroby, přičemž bylo zjištěno, že přetavení povrchu se zdá být perspektivním postupem zacelení povrchové porozity plazmových nástřiků.

V experimentální části byly nataveny povrchy nástřiků wolframu různými parametry. Během úvodních experimentů bylo zjištěno, že se taví nejdříve podkladová ocel a teprve poté wolfram na povrchu. Při přetavení je tedy nutné přivést teplo intenzivně a rychle a tím eliminovat natavení podložky pod nástřikem.

Práce byla poznamenána nízkým počtem vzorků k dispozici a značně omezeným časem pro vypracování experimentální části. Pro další výzkum lze doporučit zlepšení odvodu tepla ze vzorku a také zajištění opakovatelnosti výsledku.

Reference

- [1] WESSON, John. *The Science of JET: The achievements of the scientists and engineers who worked on the Joint European Torus 1973-1999* [online]. JET Report, JET-R (99) 13 (1999), 2000 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: http://harold.marion.free.fr/cours_free/jets.pdf
- [2] *The Direction Established* [online]. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2020 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <https://www.nobelprize.org/prizes/themes/the-direction-established>
- [3] ŘÍPA, Milan, Jan MLINÁŘ, Vladimír WEINZETTL a František ŽÁČEK. *Řízená termojaderná fúze pro každého* [online]. Třetí přepracované vydání. Praha: TA PRINT, s.r.o., 2011 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/fuze_sceen.pdf
- [4] KIKUCHI, Mitsuru a Karl LACKNER. *Fusion Physics*. International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA, 2012. ISBN 978-92-0-130410-0. Dostupné také z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1562_web.pdf
- [5] MLYNÁŘ, Jan. ITER: cesta ke zvládnutí řízené termonukleární fúze. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* [online]. 2004, **49**(2) [cit. 2020-02-29]. ISSN 129-150. Dostupné z: https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/141220/PokrokyMFA_49-2004-2_6.pdf
- [6] KULHÁNEK, Petr. *Úvod do teorie plazmatu*. Vyd. 1. Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80904582-2-2.
- [7] FRANK-KAMENETSKII, D. A. *Plasma: The Fourth State of Matter* [online]. 1st edition. Boston, MA: Springer US, 1972 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1007/978-1-4684-1896-5. ISBN 978-1-4684-1898-9. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=Q_vpBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=P

A1&dq=fourth+state+of+matter&ots=KE3mbLH1B0&sig=t6XND_EbEduxli1a
Of4I9sU3ki8&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

- [8] PFALZNER, Susanne. *An introduction to inertial confinement fusion*. New York: Taylor & Francis/CRC Press, 2006. ISBN 0-7503-0701-3.
- [9] STACEY, Weston M. *Fusion: An Introduction to the Physics and Technology of Magnetic Confinement Fusion* [online]. Second, Completely Revised and Enlarged edition. Federal Republic of Germany: WILEY-WCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010 [cit. 2020-06-26]. ISBN 978-3-527-40967-9. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=moC-FPqFi8gC&oi=fnd&pg=PR5&dq=magnetic+confinement+of+plasma&ots=oo8Y4ZsJeX&sig=1eIXOPimr_W8hqnLWW2g8-4ehNQ&redir_esc=y#v=onepage&q=magnetic%20confinement%20of%20plasma&f=false
- [10] Základy fúzní energetiky II.: Základní fyzika fúzních reaktorů. In: *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2001 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14538-zaklady-fuzni-energetiky-ii-zakladni-fyzika-fuznich-reaktoru>
- [11] Engineering challenges and development of the ITER Blanket System and Divertor. *Fusion Engineering and Design* [online]. 2015, **96-97**(10), 37-38 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0920379615300764?token=6BD4A56A384CBECD97EA64B1E9495F54EE99ACF46CA34C538D0984D5FD630A7E87226E8C7A2BB86E65AEE4A8DB32EC1B>
- [12] IOKI, K, V BARABASH, A CARDELLA et al. Design and material selection for ITER first wall/blanket, divertor and vacuum vessel. *Journal of Nuclear Materials*. 1998, **258-263**, 74-84. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(98\)00356-0](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(98)00356-0). ISSN 0022-3115. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311598003560>

- [13] ENTLER, Slavomír a Jan MLYNÁŘ. *Spoutání slunce*. Vydání 1. Praha: Středisko společných činností AV ČR, v.v.i., 2016. Věda kolem nás. ISBN 978-80-270-0252-8.
- [14] *ITER* [online]. St. Paul-lez-Durance (Francie): ITER Organisation, 2020 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <https://www.iter.org>
- [15] ONGENA, J., R. KOCH, R. WOLF a H. ZOHRM. Magnetic-confinement fusion. *Nature Physics*. 2016, **12**(5), 398-410. DOI: 10.1038/nphys3745. ISSN 1745-2481. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1038/nphys3745>
- [16] MATĚJÍČEK, Jiří, Pavel CHRÁSKA a Jochen LINKE. Thermal Spray Coatings for Fusion Applications—Review. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2007, **16**(1), 64-83. DOI: 10.1007/s11666-006-9007-2. ISSN 1544-1016. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s11666-006-9007-2>
- [17] MATĚJÍČEK, Jiří. Materials for Fusion Applications. *Acta Polytechnica* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013, **53**(2), 197-212 [cit. 2020-03-03]. ISSN 1805-2363. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/67039>
- [18] PHILIPPS, V. Tungsten as material for plasma-facing components in fusion devices. *Journal of Nuclear Materials*. 2011, **415**(1), 2-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.01.110>. ISSN 0022-3115. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311511001589>
- [19] NEU, R., R. DUX, A. GEIER et al. Tungsten as plasma-facing material in ASDEX Upgrade. *Fusion Engineering and Design* [online]. 2003, **65**(3), 367-374 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1016/S0920-3796(02)00381-2. ISSN 09203796. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0920379602003812>
- [20] MAHAMOOD, Rasheedat Modupe a Esther Titilayo AKINLABI. Types of Functionally Graded Materials and Their Areas of Application. *Functionally Graded Materials* [online]. Švýcarsko: Springer, Cham, 2017, s. 9-21 [cit. 2020-03-04]. ISBN 978-3-319-53756-6.
- [21] VERGARA, Victor, Jair CARLOS a Ana Sofia CLIMACO DOLIVEIR. Hardfacing by Plasma Transferred Arc Process. SUDNIK, Wladislav, ed. *Arc*

- Welding* [online]. InTech, 2011, s. 1-2 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.5772/28802. ISBN 978-953-307-642-3. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/arc-welding/hardfacing-by-plasma-transferred-arc-process>
- [22] GATTO, A., E. BASSOLI a M. FORNARI. Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys: process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2004, **187**(2-3), 265-271 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.02.013. ISSN 02578972. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897204001446>
- [23] MATĚJČEK, Jiří, Yoshie KOZA a Vladimír WEINZETTL. Plasma sprayed tungsten-based coatings and their performance under fusion relevant conditions. *Fusion Engineering and Design* [online]. 2005, **75-79**, 395-399 [cit. 2020-03-09]. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2005.06.006. ISSN 09203796. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0920379605000712>
- [24] MATĚJČEK, Jiří a Petr HOLUB. Laser Remelting of Plasma-Sprayed Tungsten Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2014, **23**(4), 750-754 [cit. 2020-03-07]. DOI: 10.1007/s11666-014-0067-4. ISSN 1059-9630. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11666-014-0067-4>
- [25] XIE, Guozhi, Yijun LU, Ziyi HE, Bing HU, Keyu WANG, Xiangyin MO, Yuping WU a Pinghua LIN. Microstructure and corrosion properties of plasma-sprayed NiCr–Cr3C2 coatings comparison with different post treatment. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2008, **202**(13), 2885-2890 [cit. 2020-03-07]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.10.024. ISSN 02578972. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897207011656>
- [26] AHMADI-PIDANI, Raheleh, Reza SHOJA-RAZAVI, Reza MOZAFARINIA a Hossein JAMALI. Improving the thermal shock resistance of plasma sprayed CYSZ thermalbarrier coatings by laser surface modification. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2012, **5**(50), 780-786 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816611003642?via%3Dihub>

- [27] YAN, M. a W.Z. ZHU. Surface remelting of Ni-Cr-B-Si cladding with a micro-beam plasma arc. *Surface and Coatings Technology* [online]. 1997, **92**(1-2), 157-163 [cit. 2020-03-07]. DOI: 10.1016/S0257-8972(97)00076-5. ISSN 02578972. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897297000765>
- [28] YAN, M. a W.Z. ZHU. A new approach of surface treatment: micro-beam plasma arc remelting. *Materials Letters* [online]. 1998, **34**(3-6), 222-225 [cit. 2020-03-07]. DOI: 10.1016/S0167-577X(97)00159-6. ISSN 0167577X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167577X97001596>
- [29] Termočlánkový snímač teploty - termočlánek: Úvod do termoelektrických snímačů teploty. *OMEGA* [online]. Karviná: OMEGA Engineering inc., 1995 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: https://www.omegaeng.cz/prodinfo_cz/termoclanek.html
- [30] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Seebeckův jev. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. Česká republika: Jaroslav Reichl and Martin Všeticka, 2006 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [31] Termočlánky. In: *Jan Klepárník - WEB podpora výuky* [online]. Brno: Mendelova Zemědělská A Lesnická Univerzita V Brně [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_tcl.htm
- [32] PPC 250 R6 - plazmový navařovací automat. *PROSVÁŘENÍ CZ* [online]. Bradlečká Lhota: PROSVÁŘENÍ CZ [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://prosvareni.cz/ppc-250-r6-plazmovy-navarovaci-automat/>
- [33] MĚŘICÍ ÚSTŘEDNA ALMEMO 5690-2M. *AHLBORN* [online]. Praha: AHLBORN měřicí a regulační technika s.r.o., 1990 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/out/pictures/wysiwigpro/ALMEMO%205690-2M-bc.pdf>
- [34] Příslušenství. In: *Svarservis Group* [online]. Ostrava: Svarservis Group s.r.o., 2017 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.svarservis.cz/produkty/prislusenstvi/>

- [35] Revised Thermocouple Reference Tables: Type K. *JAKAR Electronics* [online]. Karviná: JAKAR Electronics, 1991 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: https://www.jakar.cz/wp-content/uploads/2018/08/tc_typ_K.pdf
- [36] Labotom-3: Katalog. *Priniotakis* [online]. priniotakis.gr, 2011 [cit. 2020-07-08]. Dostupné z: http://www.priniotakis.gr/catalog2/manuals/Labotom-3_brochure_English.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 1: Základní schéma reaktoru typu Tokamak [10]	13
Obrázek 2: Srovnání PTA s PAW [21].....	18
Obrázek 3: Schéma obvodu termočlánku [31]	20
Obrázek 4: Detail upnutí polotovaru	22
Obrázek 5: Schéma termočlánků	23
Obrázek 6: Schéma dráhy hořáku	24
Obrázek 7: Detail upnutí zkušební destičky s přivařenými termočlánky	26
Obrázek 8: Přetavený povrch vzorku č. 1	27
Obrázek 9: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 2	28
Obrázek 10: Přetavený povrch vzorku č. 2	29
Obrázek 11: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 3	30
Obrázek 12: Přetavený povrch vzorku č. 3	30
Obrázek 13: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 4	31
Obrázek 14: Přetavený povrch vzorku č. 4	32
Obrázek 15: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 5	33
Obrázek 16: Přetavený povrch vzorku č. 5	33
Obrázek 17: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 6	34
Obrázek 18: Přetavený povrch vzorku č. 6	35
Obrázek 19: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 7	36
Obrázek 20: Přetavený povrch vzorku č. 7	36

Obrázek 21: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 8	37
Obrázek 22: Přetavený povrch vzorku č. 8.....	38
Obrázek 23: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 9	39
Obrázek 24: Přetavený povrch vzorku č. 9.....	39
Obrázek 25: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 10	40
Obrázek 26: Přetavený povrch vzorku č. 10.....	41
Obrázek 27: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 11	42
Obrázek 28: Přetavený povrch vzorku č. 11	42
Obrázek 29: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 12	43
Obrázek 30: Přetavený povrch vzorku č. 12.....	43
Obrázek 31: Graf průběhu teploty pro vzorek č. 13, 14, 15	44
Obrázek 32: Přetavený povrch vzorku č. 13	44
Obrázek 33: Přetavený povrch vzorku č. 14.....	45
Obrázek 34: Přetavený povrch vzorku č. 15	45
Obrázek 35: Řez vzorkem č. 2.....	46
Obrázek 36: Řez vzorkem č. 3.....	46
Obrázek 37: Řez vzorkem č. 9.....	47
Obrázek 38: Řez vzorkem č. 12.....	47
Obrázek 39: Řez vzorkem č. 7.....	48